

ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE GESTION INTÉGRÉE DES REJETS
MINIERS PERMETTANT DE MINIMISER L'IMPACT DES OPÉRATIONS MINIÈRES

Par
Christine L. Toma

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Thomas Pabst

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mai 2021

SOMMAIRE

Mot clés : rejets miniers, résidus miniers, stériles miniers, restauration, drainage minier acide, environnement.

L'objectif de cet essai est d'examiner les méthodes de gestion des rejets miniers qui permettent de réduire les impacts des principales problématiques rencontrées par les entreprises minières. Cette industrie est essentielle pour la production de biens et est un secteur économique bien développé au Québec. Les entreprises doivent constamment améliorer leurs méthodes de production et de gestion afin de minimiser les externalités négatives dans les différentes sphères comme l'environnement, la société et l'économie. Trouver un équilibre entre ces divers secteurs est un défi puisque l'industrie minière exploite divers minéraux non renouvelables à des fins lucratives. L'évolution des normes environnementales, des lois et règlements ainsi que la conscientisation des citoyens face à ce domaine contraignent les entreprises à améliorer leurs pratiques.

La présentation des principales problématiques environnementales, économiques et sociales rencontrées par l'industrie minière permet de comprendre la portée qu'un site d'exploitation peut avoir sur un territoire à court et long terme. Certains enjeux comme la stabilité physique et géochimique sont connus depuis longtemps. Les impacts sur les communautés et les paysages demandent une gestion différente et innovante de la part des entreprises, notamment en termes de participation publique et de création de liens de confiance avec les communautés. La protection de l'environnement est aussi un secteur qui prend de plus en plus de place dans la gestion des rejets miniers. La problématique des coûts peut pour sa part être présentée sous plusieurs formes soit : les coûts environnementaux, les coûts sociaux et les coûts directement liés aux dépenses monétaires. La présentation des techniques de gestion expose les avantages à utiliser différentes pratiques en fonction du type de résidus et des conditions particulières du site. Ensuite, l'analyse présente les méthodes de gestion en mettant l'emphasis sur leur efficacité à diminuer les impacts des différentes problématiques exposées.

Cette étude permet de constater que des méthodes couramment employées pour leurs avantages économiques ne permettent pas toujours de réduire suffisamment les principales problématiques d'un site d'exploitation. L'analyse présente aussi la combinaison de certaines méthodes ce qui permet de gérer plusieurs enjeux à la fois. Parmi les principales recommandations présentées dans cet essai, la poursuite des travaux de recherche et développement semble essentielle ainsi que l'amélioration de la communication avec les citoyens et l'utilisation de méthodes qui permettent une restauration efficace et intégrée. L'analyse des impacts sur les divers secteurs doit aussi être plus poussée qu'auparavant.

REMERCIEMENTS

Cet essai est l'aboutissement de mon parcours académique. Au fil des sessions, j'y ai rencontré des gens extraordinaires qui ont partagé les joies et les angoisses de ce long chemin vers l'obtention de la maîtrise. Merci particulièrement à Karine, Marie-Lee et Stefanie pour tous les moments partagés ensemble lors des trois dernières années.

Je tiens à remercier mon directeur d'essai, Thomas Pabst, qui m'a orientée et conseillée tout au long de ma rédaction. Grâce à sa disponibilité et ses conseils, j'ai réalisé un travail dont je suis extrêmement fière. Je n'aurais pas pu livrer cet essai sans son soutien et son esprit critique.

Merci à mes parents de toujours m'avoir soutenu dans mon parcours académique et encouragé à aller plus loin.

Merci à mon conjoint Laurent, de m'avoir encouragé, aidé et écouté depuis le début de la maîtrise. Ta présence m'a permis d'y arriver !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. PRODUCTION DES REJETS MINIERs.....	3
1.1 Extraction du minerai	4
1.2 Génération des résidus miniers.....	5
1.2.1 Séparation physique.....	6
1.2.2 Séparation chimique.....	7
1.3 Préparation du concentré	7
2. PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES	8
2.1 Stabilité physique	8
2.1.1 Normes de références	8
2.1.2 Types de digues	9
2.1.3 Causes des ruptures.....	10
2.1.4 Conséquences des ruptures de digues.....	11
2.2 Stabilité géochimique	12
2.2.1 Drainage minier acide	13
2.2.2 Drainage neutre contaminé.....	14
2.2.3 Arsenic.....	14
2.2.4 Cyanure	15
2.2.5 Conséquences de la contamination	15
2.3 Paysages et communautés	16
2.3.1 Impacts sociaux.....	16
2.3.2 Paysages.....	19
2.4 Coûts	20
2.4.1 Coûts environnementaux	21
2.4.2 Coûts sociaux.....	23
2.4.3 Autres investissements	24
3. MÉTHODES DE GESTION INTÉGRÉE.....	26
3.1 Désulfuration environnementale.....	26

3.2	Remblais.....	30
3.2.1	Remblai souterrain	30
3.2.2	Remblai en fosse.....	32
3.3	Densification	34
3.3.1	Rejets épaisiss	35
3.3.2	Résidus en pâte	35
3.3.3	Résidus filtrés.....	36
3.4	Co-disposition.....	37
3.4.1	Mélanges.....	38
3.4.2	Déposition en couche alternée.....	39
3.4.3	Inclusions de roches stériles	40
3.5	Valorisation.....	42
4.	RESTAURATION.....	44
5.	PRÉSENTATION DE LA MATRICE D'ANALYSE	45
5.1	Méthodologie	45
5.2	Présentation de l'échelle	46
6.	ANALYSE	47
6.1	Analyse de la désulfuration environnementale	47
6.2	Analyse remblais	49
6.3	Analyse valorisation	51
6.4	Analyse co-disposition.....	52
6.5	Analyse densification.....	54
6.6	Analyse combinée remblai souterrain et désulfuration	55
6.7	Analyse combinée inclusion de roches stériles et résidus filtrés	56
6.8	Analyse combinée valorisation et désulfuration	58
7.	RECOMMANDATIONS	60
7.1	Recommandations en recherche et développement.....	60
7.2	Recommandations liées aux communautés	61
7.3	Recommandations liées aux techniques.....	62

7.4	Recommandations pour les méthodes de gestion..	62
CONCLUSION		64
RÉFÉRENCES		65

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Processus de production de rejets miniers	5
Figure 2.1	Principales méthodes de construction des digues à résidus miniers	10
Figure 2.3	Chantier de la mine Canadian Malartic en bordure des résidences	18
Figure 2.4	Site d'exploitation de la mine Jeffrey et la ville construite en périphérie des installations...	19
Figure 2.5	Secteurs affectés par les émissions produites par les rejets miniers	21
Figure 2.6	Liens entre les différentes sphères environnementales et leur type d'interactions	22
Figure 3.1	Intégration d'un circuit de désulfuration dans le procédé de traitement	27
Figure 3.2	Profil d'une fosse suite à l'extraction du minerai	33
Figure 3.3	Différentes techniques de densification des résidus passants d'un état solide à liquide ..	34
Figure 3.4	Différents niveaux de mélanges de stériles miniers et de résidus de concentrateurs	38
Figure 3.5	Cellules de stérile minier contenant des résidus densifiés	40
Figure 3.6	Structure d'un ouvrage comportant des inclusions de roches stériles	41
Figure 6.1	Performance de la désulfuration environnementale	47
Figure 6.2	Performance du remblai	49
Figure 6.3	Performance de la valorisation	51
Figure 6.4	Performance de la co-disposition	52
Figure 6.5	Performance de la densification	54
Figure 6.6	Performance remblai souterrain et désulfuration	55
Figure 6.7	Performance des inclusions de roches stériles et des résidus filtrés	56
Figure 6.8	Performance de la valorisation et de la désulfuration	58
Tableau 2.2	Réaction de l'oxygène de la pyrite par l'oxygène	13
Tableau 5.2	Présentation des différents niveaux d'efficacité pour la résolution d'une problématique ..	46

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
GES	Gaz à effet de serre

LEXIQUE

Gangue	<< Résidus minéraux sans valeur économique.>> (Environnement Canada, 2009)
Mort terrain	La portion du sol qui se trouve au-dessus de la roche et qui ne nécessite pas de travaux de concassage ou de dynamitage pour son excavation. (Office québécoise de la langue française, 1984) Le mort terrain est généralement excavé et entreposé par les compagnies minières le temps de l'opération puis réutilisé lors de la restauration.

INTRODUCTION

L'industrie minière contribue depuis longtemps et de façon significative au développement économique de notre province notamment dans le Nord québécois. De nombreux travaux de recherche et développement technologique visent à optimiser toutes les étapes de production. La phase de fermeture du site est maintenant considérée dès le départ. (Aubertin et al., 2015) Lorsque le site n'est plus rentable économiquement, les travaux de fermeture et de restauration commencent officiellement. Selon les lois et règlements du Québec, une restauration minière est terminée lorsque le site est ramené à un état satisfaisant, c'est-à-dire sécuritaire pour les communautés vivant à proximité, où la propagation de contaminants est limitée et contrôlée et où le paysage s'intègre à l'environnement (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, s. d.). Toutes les entreprises minières doivent gérer une grande quantité de rejets. Le minéral extrait est généralement très dilué dans la roche et le volume extrait est faible pour une grande quantité de rejets miniers produits. (Bussière, 2007) Ce phénomène crée de nombreux problèmes environnementaux et les coûts de gestion sont élevés. Plusieurs types de rejets existent et demandent une gestion spécifique en fonction de multiples facteurs comme les caractéristiques du site, les propriétés des rejets ou les caractéristiques de l'exploitation. (Aubertin et al., 2002)

Les aspects environnementaux liés aux problématiques de la gestion des résidus miniers doivent être gérés efficacement afin de préserver les écosystèmes environnants. Au niveau économique, l'amélioration des techniques de gestion et de restauration permet aussi de réduire les coûts pour les entreprises. Les méthodes conventionnelles possèdent leurs limites et plusieurs nouvelles approches sont plus économiques et plus efficaces. Il est possible de répondre aux principales problématiques de gestion des rejets miniers en analysant les forces de chacune des méthodes et la combinaison de celles-ci.

Le principal objectif de cet essai est d'analyser les méthodes de gestion des rejets miniers dans l'optique de minimiser les impacts des principaux enjeux soit la stabilité physique, la stabilité géochimique, les enjeux de communautés et paysages ainsi que les coûts. Pour ce faire, les différents enjeux seront présentés et les impacts seront décrits. Plusieurs méthodes de gestion intégrées innovantes seront ensuite décrites en expliquant les avantages apportés à la résolution des défis décrits plus haut. L'applicabilité des méthodes aux différents enjeux sera analysée pour pouvoir proposer des recommandations sur la gestion des rejets miniers. Les objectifs spécifiques permettent de répondre à l'objectif principal. L'utilisation d'une matrice d'analyse intégrant une échelle de pondération permet de présenter les résultats de l'analyse de manière objective et sous forme de graphiques afin de comparer les avantages et limites des différentes techniques en fonction des problématiques présentées.

Les sources d'information utilisées dans le cadre de cet essai sont principalement des articles de recherche émanant de la communauté scientifique. La revue de littérature repose sur des informations fiables, crédibles et objectives. Plusieurs articles sont révisés par les pairs et proviennent des banques de données de publications scientifiques. Certains articles de quotidien sont également utilisés afin de présenter des exemples concrets et actuels.

Cet essai contient quatre grandes sections, divisé en sous-sections. La première section concerne la production des rejets miniers. Cette section permet de comprendre comment le processus d'extraction mène à la production de différents rejets qui doivent être gérés par les entreprises. La deuxième section présente les principales problématiques liées à la gestion des rejets miniers. Les causes et les impacts de ces problématiques y sont présentés. La troisième section présente les nouvelles méthodes de gestion et de restauration qui sont utilisées dans l'industrie : la désulfuration environnementale, les remblais, la densification, la co-disposition et la valorisation. Les techniques sont détaillées afin de présenter les avantages apportés par chaque méthode. La méthodologie et l'analyse sont présentées dans la troisième section. Une explication du choix de la pondération est proposée ainsi que du type de graphique utilisé pour présenter les résultats. Une analyse détaillée de chacune des méthodes est réalisée présentant l'applicabilité à l'amélioration des problématiques. Une combinaison de certaines techniques est aussi analysée pour illustrer les avantages possibles. Finalement, la dernière section présente des recommandations afin d'améliorer la gestion des rejets pour les différentes problématiques présentées.

1. PRODUCTION DES REJETS MINIERES

L'exploitation d'un gisement minier a pour objectif d'extraire un minerai contenant un minéral (par exemple : or, argent, métal de base, diamant) ayant une valeur commerciale. La quantité de minéraux ou de métaux dans la roche doit être assez élevée pour justifier le démarrage des opérations. Les techniques d'évaluation et d'extraction évoluent constamment (Matheus, 2018). Plusieurs étapes sont nécessaires avant de commencer l'exploitation du minerai. La phase d'exploration et d'étude de faisabilité permet de réaliser le repérage initial du minerai afin d'évaluer si le projet est viable économiquement. La planification et la construction du site viennent ensuite. Ces étapes permettent de planifier l'ensemble du plan d'affaires et d'effectuer toutes les étapes administratives et réglementaires requises. (Environnement Canada, 2009) Lorsqu'une compagnie minière possède toutes les approbations nécessaires, que les routes sont construites et les campements sont en place, l'exploitation peut commencer.

Différents facteurs déterminent si une mine sera à ciel ouvert ou souterraine. La profondeur du gisement, l'empreinte au sol ainsi que les coûts d'exploitation sont des éléments qui sont évalués afin de déterminer le type d'exploitation. En général, une première couche de sol ou mort terrain doit être déplacée afin d'accéder à la zone minéralisée. (Comité sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie des mines, s. d.)

L'exploitation à ciel ouvert est réalisée selon deux techniques en fonction de la disposition du gisement. L'exploitation en découverte est utilisée lorsque le minerai se trouve près de la surface et s'étend sur une grande surface horizontale. (Matheus, 2018) Les mines sont alors très larges et possèdent des parois latérales stables (Environnement Canada, 2009). L'exploitation à ciel ouvert en fosse est caractérisée par un puits de grande dimension, profond et qui se poursuit souvent sous la nappe phréatique (Johnson et Carroll, 2007). Dans les deux situations (en découverte et en fosse), la quantité de roches excavées est importante et l'empreinte au sol est considérable. En revanche, la mise en œuvre du chantier est rapide. Des équipements spécialisés sont utilisés pour la réalisation des travaux qui s'étendent sur plusieurs kilomètres. La teneur de la minéralisation pour une opération à ciel ouvert peut être de faible à haute. En effet, un site peut être viable économiquement même si la teneur du gisement est faible puisque l'efficacité des nouvelles techniques de production permet d'obtenir un volume de minerai suffisant pour que l'exploitation soit rentable. Par exemple, une exploitation d'or comme la mine Canadian Malartic en Abitibi-Témiscamingue présente des teneurs moyennes autour de 1,11 g/t Au ce qui est significativement plus faible que la plupart des mines souterraines (Canadian Malartic, 2019).

L'autre type d'exploitation est la mine souterraine qui permet l'extraction du minerai par des puits et des galeries sous la surface. La quantité de mort terrain qui doit être dégagée ainsi que la quantité de matériaux

stériles à déplacer sont plus faibles que pour une exploitation à ciel ouvert, et l'empreinte au sol est aussi réduite. (Matheus, 2018) L'extraction du minerai est plus sélective ce qui diminue le rapport entre le volume des stériles miniers et le minerai par rapport à une exploitation à ciel ouvert (Environnement Canada, 2009). La profondeur d'une mine souterraine varie typiquement entre 200 et 3000 mètres. Plusieurs structures comme des rampes, des tunnels et des puits sont nécessaires sur plusieurs niveaux pour accéder au gisement. L'installation de ce type d'exploitation est complexe puisqu'il faut travailler dans un espace restreint tout en assurant la sécurité des travailleurs. En plus d'aménager les accès, il faut aussi mettre en place un système de ventilation pour assurer un apport d'air frais dans toutes les zones. (Matheus, 2018)

Le choix du type de production dépend de l'emplacement des sites, du type de minerai exploité, du climat ainsi que de plusieurs autres facteurs qui rendent chaque exploitation unique.

1.1 Extraction du minerai

Une fois le mort terrain dégagé, des travaux de dynamitage sont nécessaires afin d'accéder au gisement. Bien qu'il existe des différences opérationnelles entre les mines à ciel ouvert et celles souterraines, dans les deux cas une quantité de roche contenant peu ou pas de métal valorisable est produite. On parle de stériles miniers (ou roches stériles). (Bussière et Guittonny, 2017) La teneur de coupure définit si la teneur en minéral de la roche excavée est assez élevée pour être considérée exploitable ou si la teneur du minerai est trop faible auquel cas elle sera considérée comme un rejet. Le minerai qui est au-dessus de la teneur de coupure est envoyé vers l'usine de traitement. (IAMGOLD corporation, s. d) La taille des particules de roches stériles varie de quelques microns à des roches de plusieurs mètres de diamètre. Les stériles sont entreposées dans des aires d'accumulation nommées haldes à stériles (figure 1.1). La méthode d'empilement des stériles miniers influence leurs propriétés géotechniques et hydrogéologiques, la porosité et la ségrégation des particules. Typiquement, les particules plus fines se retrouvent au sommet de la pile et les particules de plus grandes dimensions s'accumulent dans le bas des pentes. La circulation de l'eau et de l'oxygène se fait en fonction de l'arrangement hétérogène de l'empilement. La circulation de l'eau dans les empilements va passer de façon préférentielle par les chemins plus larges formés par les plus grosses roches. La circulation de l'air est aussi favorisée par la granulométrie grossière des roches stériles et leur faible teneur en eau. (Bussière et Guittonny, 2017) Une mine à ciel ouvert produit un ratio stérile/résidus plus grand qu'une opération souterraine.

Le minerai est alors concassé et broyé afin d'atteindre la maille de libération des minéraux d'intérêt. Le concassage est généralement réalisé à sec et permet de réduire le minerai en particule grossière. Le broyage, effectué en milieu humide (figure 1.1) permet de réduire encore davantage la dimension des

particules. Ces deux étapes doivent produire des particules assez fines (en général quelques centaines de micromètres) pour atteindre la maille de libération du minerai.

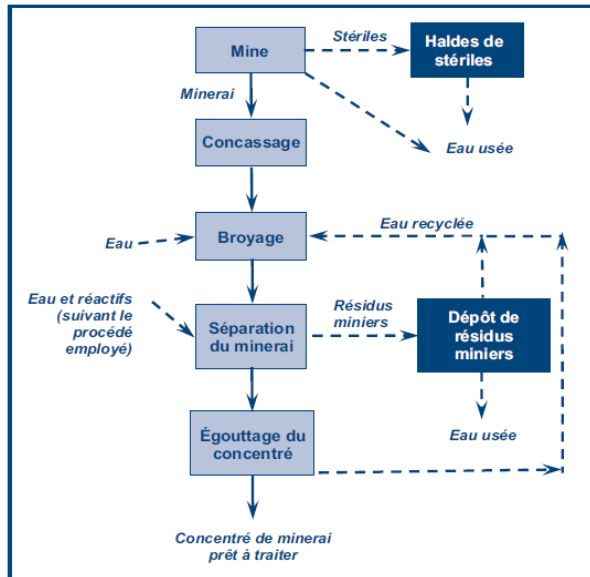


Figure 1.1 Processus de production des rejets miniers (tiré de : Environnement Canada, 2009, p.31)

La roche extraite à la mine avec une concentration en minéraux supérieure à la teneur de coupure est d'abord concassée puis broyée avant d'être concentrée. Les résidus miniers résultant de la séparation du minerai sont envoyés dans un dépôt (souvent dans un ouvrage de retenue).

1.2 Génération des résidus miniers

Une séparation supplémentaire du minerai doit être réalisée afin de dissocier les minéraux d'intérêt (par exemple l'or, le fer ou le nickel) de ceux sans valeur économique (comme les minéraux silicatés, carbonatés ou des minéraux métalliques comme la pyrite ou la chalcoppyrite) et ainsi obtenir un concentré qui sera ensuite vendu (Matheus, 2018). Durant cette étape, les produits sans valeur économique sont générés et appelés résidus miniers ou rejets de concentrateur puis envoyés dans une aire d'accumulation ou d'entreposage de résidus miniers, souvent appelée parc à résidus (figure 1.1) (Environnement Canada, 2009). La composition de ces résidus dépend du type de minerai traité et des produits utilisés lors de la concentration. Les résidus miniers sont un mélange d'eau et de roche broyée dont les propriétés dépendent des méthodes de séparations employées (Toguri, 2015). Les résidus sont déposés depuis la crête des parcs et la ségrégation naturelle des particules fait en sorte qu'il se crée des secteurs avec des particules

plus denses et plus grossières près des points de décharge et les particules plus fines et légères migrent vers le centre de la structure. La distribution granulométrique des résidus est caractérisée par un D_{10} (c'est-à-dire le diamètre correspondant à 10 % passant dans la courbe granulométrique) de 1 à 4 μm et un D_{60} de 10 à 50 μm . La porosité observée est de 0,33 à 0,5. (Bussière et al., 2017) Le diamètre des particules des résidus se situe entre le limon (0,002 à 0,06 mm) et le sable (0,06 à 2 mm). La ségrégation des particules fait en sorte que les propriétés des résidus peuvent varier verticalement (la différence de placement en fonction des points d'évacuation) et horizontalement (ségrégation des particules) dans l'ouvrage de retenue. La conductivité hydraulique saturée des résidus de concentrateur influence la migration de l'eau et des contaminants. Des mesures en laboratoire ont montré que la conductivité hydraulique saturée des résidus était généralement comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} cm/s. (Bussière, 2007)

1.2.1 Séparation physique

La séparation physique du minerai est réalisée à l'aide de plusieurs techniques. Ce sont les propriétés physiques des minéraux qui sont utilisés pour séparer les minéraux et obtenir un concentré (Environnement Canada, 2009).

La technique de séparation par flottation est basée sur les différentes hydrophobicités des composantes du mélange. Dans un bain liquide, avec le minerai broyé et de l'eau, des bulles d'air sont diffusées en continu pour favoriser le contact entre toutes les composantes. Les substances hydrophobes s'accrochent aux bulles et flottent jusqu'à la surface pour former une mousse appelée le concentré de flottation (Environnement Canada, 2009). Les particules hydrophiles (les résidus ici) se retrouvent dans le fond des cuves (Environnement et Changement climatique Canada, 2015). Cette technique permet de concentrer de façon significative la substance traitée.

La séparation par gravité est une autre méthode de séparation physique. La densité du minerai traité est utilisée pour créer une différence entre la densité du métal et des autres minéraux afin de les séparer (Environnement Canada, 2009). La séparation gravimétrique permet de séparer les particules plus lourdes avec la force centrifuge, le concentré est recueilli dans un collecteur au bas de spirales. (Multotec Canada, s. d.)

La séparation magnétique utilisée par certaines mines de fer consiste à faire passer le minerai broyé dans des tambours qui recueillent la matière magnétique afin de récupérer du matériel avec une concentration

plus élevée de minerai. Une fois la teneur désirée obtenue, des boulettes sont formées avec un liant comme de la bentonite puis elles sont cuites au four. (Multotec Canada, s. d.)

1.2.2 Séparation chimique

L'utilisation de techniques chimiques afin de séparer le minerai est une autre façon de libérer le composé valorisable.

La lixiviation au cyanure, ou cyanuration est une extraction hydro métallurgique. Deux méthodes sont possibles soit la cyanuration en cuve et la lixiviation en tas. La première s'effectue dans une série de cuves où la pulpe (mélange de roche broyée et d'eau) est placée avec le cyanure. Un mouvement constant dans les cuves est requis. La solution passe ensuite dans une cuve avec du charbon actif afin d'absorber le minerai. (SGS, s. d.) La lixiviation en tas est généralement préférée si le minerai est moins concentré. La roche concassée est placée sur des bâches imperméables et une solution de cyanure est appliquée sur le tas afin de dissoudre le minerai. La solution est envoyée dans une cuve pour être mise en contact du charbon actif. (Matheus, 2018)

La lixiviation est un procédé utilisé pour la séparation de métaux rares. Le minerai qui est préalablement broyé est mis en contact avec une solution concentrée d'acide sulfurique. La solution est exposée à une température élevée entre 200 et 800 degrés Celsius. Le minerai est insoluble durant cette étape et c'est durant le mélange avec d'autres produits que les particules sont extraites de la solution par des solvants ou l'absorption sur une résine. (Demol et al., 2019)

1.3 Préparation du concentré

Le concentré de minerai obtenu suite aux différentes techniques de séparation se trouve sous forme de pulpe gorgée d'eau. L'eau doit être retirée pour obtenir un concentré adapté aux prochaines étapes de valorisation. La pulpe subit un épaississement via sédimentation par gravité. La pulpe passe dans un filtre pour capter les particules et laisser passer l'eau. (Environnement Canada, 2009) Durant les procédés d'extraction, des boues de traitement sont produites. L'utilisation d'acide durant le traitement du minerai contamine l'eau de procédé. Les entreprises doivent alors assurer sa décontamination afin de respecter les normes environnementales. (Benzaazoua, s. d.) Ce type de rejets ne sera pas traité dans cet essai puisque l'accent sera mis sur la gestion des stériles et des résidus miniers.

2. PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES

Les entreprises font face à une multitude de difficultés dans le cadre de la gestion des rejets miniers. Les principales problématiques sont présentées ci-après, mais ne représentent pas l'intégralité des défis qui peuvent survenir.

2.1 Stabilité physique

La stabilité géotechnique des ouvrages de retenue des résidus miniers est un des principaux défis auxquels fait face l'industrie minière. Les digues des parcs à résidus peuvent dépasser 100 mètres de hauteur et faire plusieurs kilomètres de long. Leur intégrité doit être maintenue du début à la fin de l'exploitation minière, mais aussi après la fermeture du site et pour une période indéfinie. Les ouvrages de retenue doivent en plus être en mesure de résister à des événements météorologiques exceptionnels et à d'éventuels séismes. La conception des digues doit donc être réalisée en tenant compte de ces facteurs. (Aubertin et al., 2013)

2.1.1 Normes de références

Les exploitants des parcs à résidus miniers doivent assurer la sécurité et la protection de l'environnement en érigeant une digue qui respecte les normes du gouvernement. Bien que la loi sur la sécurité des barrages existe, d'autres ressources spécifiques aux digues de retenue sont disponibles pour les entreprises minières. Le code de pratiques écologiques pour les mines de métaux présente une série de recommandations allant de la conception à la fermeture du site afin d'assurer la stabilité à long terme des ouvrages de retenues. Les conditions météorologiques locales, la géologie du sol, la topographie ainsi que les données sismiques font partie des éléments à considérer pour la conception d'un barrage. (Environnement Canada, 2009)

Le guide de gestion des parcs à résidus miniers produit par l'association minière du Canada permet aux propriétaires d'exploitation de se familiariser avec les lignes directrices d'une gestion responsable d'un parc à résidu. Les critères concernant la sécurité et l'environnement sont mis de l'avant pour diminuer les risques de catastrophes reliés à une défaillance des structures. (Association minière du Canada, 2017)

L'Association canadienne des barrages a un comité spécifiquement dédié aux digues de parcs à résidus miniers. Ce groupe travaille en collaboration avec les autres intervenants de l'association pour trouver des

solutions et proposer des recommandations. Un bulletin technique comportant des recommandations pour la sécurité des barrages est disponible pour les exploitants des minières. (Association canadienne des barrages, s. d.)

2.1.2 Types de digues

Les parcs à résidus sont généralement ceinturés de digues. Elles retiennent les résidus ainsi que l'eau afin de ne pas contaminer le milieu environnant. Deux types de digues existent. Le premier consiste à construire les digues à partir de matériaux naturels comme le gravier, le sable et l'argile. Ce sont des structures souvent utilisées dans l'ingénierie civile. Ces digues ont des zones imperméables, drainantes, de transition et de filtration adaptées en fonction du site minier. Elles sont montées rapidement lorsque les matériaux sont disponibles. (Aubertin et al., 2013)

Les digues peuvent aussi être construites à partir des roches stériles et/ou des rejets de concentrateur lorsque leurs propriétés physiques et chimiques sont adaptées. Dans ce cas, la construction des digues est progressive et elles sont rehaussées au fur et à mesure de la déposition des résidus. Il existe trois façons de monter la digue (figure 2.1) avec chacun leurs avantages et limites.

La méthode amont est une des méthodes les plus utilisées. Cette approche s'applique aux régions avec peu ou pas d'instabilités sismiques. C'est une option simple à mettre en œuvre pour les minières. Toutefois plusieurs inconvénients liés à cette technique limitent son application. Par exemple, les risques d'instabilité de la structure sont relativement élevés puisque chaque rehaussement de la digue repose (au moins en partie) sur des matériaux peu ou pas consolidés et potentiellement sujets à liquéfaction. De plus, la pression exercée sur la digue peut devenir critique si elle est trop élevée. Il est donc recommandé d'utiliser cette technique pour les plus petits ouvrages. (Aubertin et al., 2013)

La méthode aval est très sécuritaire, mais plus coûteuse que la méthode amont. Elle consiste à construire la digue à l'aval de la berme de départ et s'étend donc vers l'extérieur du parc de résidus (figure 2.1). Une grande quantité de matériaux est nécessaire pour la construction.

La dernière méthode est celle de l'axe central. La méthode se distingue par le maintien de la crête de la digue selon un axe vertical (figure 2.1). C'est une méthode plus stable que la méthode amont, mais qui demande une moins grande quantité de matériaux que la méthode aval. (Aubertin et al., 2013)

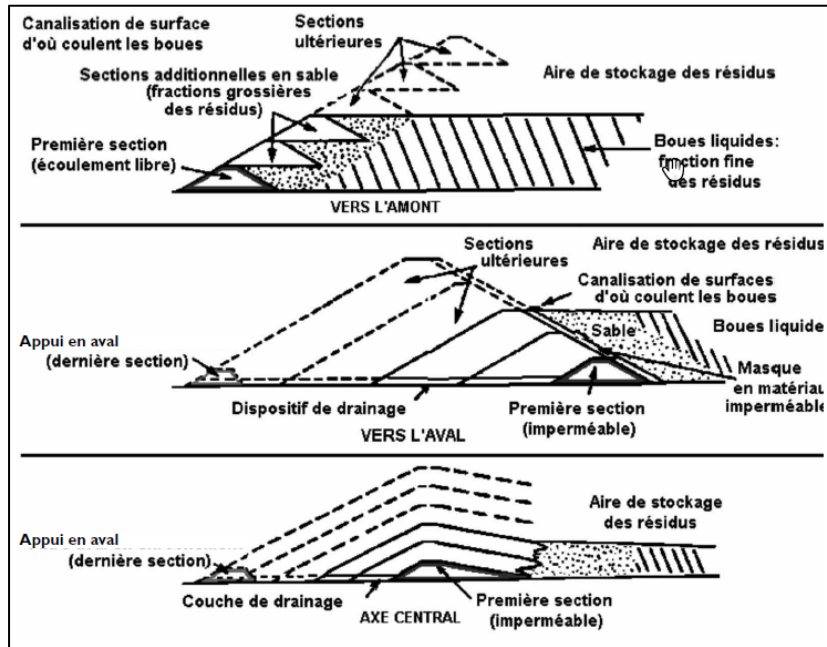


Figure 2.1 Principales méthodes de construction des digues des parcs à résidus miniers : (haut) méthode amont, (milieu) méthode aval et (bas) méthode de l'axe central (tiré de : Aubertin et al., 2013, p.33)

2.1.3 Causes des ruptures

Les ruptures des ouvrages de retenue sont médiatisées lorsqu'ils causent des dommages considérables au niveau des vies humaines, de l'économie et de l'environnement. Cependant, tous les incidents ne sont pas nécessairement rapportés dans les médias et certains ne sont pas documentés. Ce type d'incident est une mauvaise publicité que les compagnies minières souhaitent éviter. De plus, de tels événements peuvent avoir des conséquences légales et économiques lourdes. Les ruptures de parcs à résidus restent néanmoins fréquentes. (Kossoff et al., 2014)

Selon la littérature, 83 % des incidents surviennent lorsque la mine est toujours en exploitation, 15 % lorsque la mine est inactive et abandonnée et 2 % lorsque la mine est inactive et surveillée (Kossoff et al., 2014).

Le transport et la méthode de déposition des résidus dans le parc affectent la stabilité de ce dernier. Les résidus ont une densité faible et un pourcentage élevé d'eau.

Il existe de nombreuses causes à la rupture des ouvrages de retenue. Plusieurs d'entre elles sont connues et souvent documentées, mais pas toujours. Le débordement avec submersion de la crête à la suite d'une crue liée à un événement de précipitation extrême est l'une des causes les plus fréquentes. Au total, 25 % des ruptures sont liés à des événements météorologiques extrêmes. Cette observation est d'autant plus préoccupante que les changements climatiques accentuent la fréquence et l'intensité d'événements de ce type au Québec et au Canada. Les digues construites par la méthode amont sont aussi particulièrement sujettes à la rupture en raison de la liquéfaction des résidus. L'application d'une contrainte dynamique par le dynamitage ou le va-et-vient des véhicules entraîne une perte des propriétés physiques des résidus dans le parc lesquels se comportent alors comme un liquide. Une autre cause de rupture fréquente est liée à une défaillance de la fondation. La perméabilité de la fondation du barrage doit être ni trop ni trop faible afin de prévenir le développement de trop grandes pressions interstitielles. (Kossoff et al., 2014) L'érosion régressive du matériau de la digue, le mauvais fonctionnement de l'évacuateur de crue, le glissement des zones instables constituent d'autres causes fréquentes de rupture.

L'évaluation de la stabilité des ouvrages se fait au moyen de plusieurs techniques basées sur l'analyse des facteurs de sécurité. Les digues, qu'elles soient faites en matériaux naturels ou avec des rejets miniers, doivent être en mesure de résister à des événements naturels extrêmes à long terme. (Aubertin et al., 2013)

2.1.4 Conséquences des ruptures de digues

La rupture d'un ouvrage de retenue cause diverses conséquences environnementales, économiques et humaines sur le territoire. Comme chaque site est unique, l'ampleur des conséquences varie en fonction des propriétés des résidus dans le parc, de la taille de la digue, de la proximité des cours d'eau ainsi que d'autres facteurs.

Au niveau environnemental, il y a des impacts immédiats sur le territoire suite à la rupture d'une digue. La qualité de l'eau et des sédiments des cours d'eau avoisinants sont modifiés et la vie aquatique est perturbée. L'écosystème tout entier est déstabilisé par le déversement direct des rejets miniers dans les environs. Les impacts sur les poissons et les animaux terrestres peuvent apparaître à long terme. Plus tard, si des éléments comme le plomb ou l'arsenic se retrouvent dans les cours d'eau, il peut y avoir plus de pathologies

et de maladies sur la faune environnante. Une acidification du milieu est possible si les rejets miniers sont réactifs et potentiellement générateurs de drainage minier acide (DMA). La contamination des sols et des sédiments peut avoir un effet à long terme sur la productivité des cultures. Lors d'une rupture d'un barrage de retenue, il y a des conséquences environnementales immédiates observables et d'autres qui sont mesurables à long terme. (Kossoff et al., 2014)

Au niveau économique, comme les ruptures de digues surviennent majoritairement lorsque la mine est en opération, une perte financière survient par l'arrêt des opérations lors de l'incident. C'est une perte d'argent significative pour l'entreprise parce qu'un arrêt de production signifie l'arrêt d'une chaîne d'approvisionnement. Des pertes de contrats sont aussi possibles. L'entreprise doit aussi payer pour les coûts du nettoyage environnemental. Selon les normes et règlements en vigueur, une remise en état doit être réalisée. Il est possible d'ajouter des coûts socio-économique et politique à un tel incident, bien que difficilement chiffrable. (Kossoff et al., 2014) En 2008, la rupture de la digue d'un parc à résidus miniers à Chapais a causé des graves problèmes de pollution sur le territoire. La mine Opémisca était fermée depuis 1991 et son plan de fermeture était approuvé depuis 1995. Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles en est devenu propriétaire par la suite. Comme il n'existait pas de garantie financière dans ce cas précis, c'est l'état qui a dû payer pour la réhabilitation du site. (Francoeur, 2008)

En plus des conséquences environnementales et économiques, l'aspect humain doit être considéré. L'image de l'entreprise ainsi que celle de l'industrie en générale pourraient être affectées par ce type d'événements. (Aubertin et al., 2013) Lors de ces accidents, des vies humaines peuvent être perdues et les archives indiquent que plusieurs centaines de personnes sont mortes suite à des ruptures d'ouvrages de retenue. Parfois les morts sont causés directement par l'effondrement, mais souvent c'est l'inondation et le déversement des résidus suite à la rupture qui sont plus dangereux. (Kossoff et al., 2014)

2.2 Stabilité géochimique

La contamination de l'environnement par les rejets miniers est un problème complexe auquel font face les entreprises minières. L'instabilité de certains rejets est un risque environnemental qui est traité tout au long des opérations et après la fermeture de la mine.

2.2.1 Drainage minier acide

Le drainage minier acide est l'un des principaux défis des mines. L'oxydation des minéraux sulfureux présents dans la plupart des rejets miniers contribue à diminuer le pH et à libérer des métaux, des métalloïdes ainsi que des sulfates. Le drainage minier acide peut apparaître après quelques mois ou quelques semaines dans les eaux d'écoulement. (Lottermoser, 2010) Le taux d'oxydation des minéraux sulfureux dépend de nombreux facteurs comme leur abondance, leur minéralogie, la température, la présence de bactéries et la taille des grains (Ritcey, 2005).

Comme présentée dans les équations ci-dessous (tableau 2.2), l'oxydation de la pyrite par l'oxygène se fait en plusieurs étapes successives et produit de l'hydroxyde de fer et de l'acide sulfurique suivant une réaction exothermique.

Tableau 2.2 Réaction de l'oxydation de la pyrite par l'oxygène (inspiré de : Noirant, 2019)

La pyrite au contact de l'eau et de l'air va libérer des ions H^+ ce qui crée de l'acidité
$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$
Le fer ferreux devient fer ferrique
$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O$
Le fer ferrique se précipite en hydroxyde ce qui libère des ions H^+ , atteinte d'un pH acide
$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$
Oxydation indirecte des sulfures par l'eau et le fer ferrique
$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$

L'oxydation du fer se produit durant l'oxydation directe de la pyrite par l'oxygène et l'eau. Lorsque le pH diminue sous 3,5 environ, le Fe (III) a tendance à rester en solution et il peut alors devenir l'accepteur principal d'électrons. Cette réaction d'oxydation dite indirecte est plus rapide que l'équation directe (équation 1 dans le tableau 2.2) et produit davantage d'acide permettant l'atteinte de pH très faibles. (Noirant, 2019)

L'activité microbienne contribue à catalyser les réactions d'oxydation. Les bactéries comme *Acidithiobacillus thiooxidans* et *Acidithiobacillus ferrooxidans* utilisent l'énergie de la réaction exothermique pour croître et participent à l'accélération de l'oxydation des minéraux sulfureux. Elles sont bien adaptées aux milieux acides et se développent donc dans les aires d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. (Lottermoser, 2010)

2.2.2 Drainage neutre contaminé

Le drainage neutre contaminé (DNC) peut également être une source de pollution environnementale. Le drainage est classé comme contaminé lorsque la concentration des métaux et des métalloïdes dépasse les normes environnementales. On parle de drainage neutre lorsque le pH est compris entre 6 et 9,5. (Éthier, 2011) La majorité des métaux sont solubles en milieu acide. Certains métaux restent cependant solubles pour des pH autour de la neutralité. Le DNC est ainsi souvent caractérisé par des concentrations élevées de zinc, de nickel et d'arsenic. (Bussière et al., 2005)

Le DNC peut être généré de plusieurs façons. La présence de certains minéraux neutralisants (comme la calcite ou la dolomite) peut contribuer à tamponner l'acidité et à maintenir le pH de la solution autour de la neutralité. D'autres minéraux sulfureux comme la sphalérite et la galène s'oxydent également sans produire d'acide, mais en libérant des métaux (Plante et al., 2010).

2.2.3 Arsenic

L'arsenic se trouve dans les résidus d'uranium, de cuivre et de nickel, mais le plus souvent dans les résidus miniers d'or (Nicholson, 2004). C'est un métal qui s'associe avec la pyrite pour former le composé d'arsénopyrite (FeAsS) (Bussière et al., 2005). Au Québec, l'arsenic se trouve sous forme d'arsénopyrite (FeAsS) ou en faible quantité avec la pyrite. Le danger de l'arsenic pour la santé humaine est bien documenté depuis les années 80. Le FeAsS n'est pas stable en condition oxydante et va relâcher l'arsenic lorsque le composé est exposé à l'air et à l'eau. (Nicholson, 2004) Le processus d'oxydation qui libère le FeAsS va aussi produire de l'acide, du fer et des sulfates. Suite à cette libération, l'arsenic se présente sous deux formes soit As (III) et As (V), la première forme étant plus toxique et mobile. (Bussière et al., 2005)

2.2.4 Cyanure

Le cyanure est utilisé dans le procédé d'extraction de l'or. Il permet de complexer et de solubiliser l'or afin de pouvoir le concentrer. Plusieurs paramètres déterminent la quantité de cyanure nécessaire pour obtenir une extraction de qualité. Il reste toujours une quantité de cyanure dans les résidus transportés vers les parcs. Ce cyanure se présente sous plusieurs formes. La présence du cyanure est un risque de toxicité pour l'environnement aquatique et les écosystèmes terrestres environnants. Les dangers pour la santé humaine est l'association du complexe CN^- avec le fer de l'hémoglobine ce qui empêche l'oxygénation du sang. Le cyanure libre se détache facilement des complexes ce qui augmente la toxicité. Le traitement des cyanures dans l'eau est possible par différents traitements, mais le principe est la conversion du cyanure en composés moins toxiques. La méthode photo-catalytique permet d'oxyder les cyanures avec des UV. Les produits de décomposition sont les cyanates (CNO^-) et les thiocyanates (SCN^-). (Moisan et Blanchard, 2013)

2.2.5 Conséquences de la contamination

La directive 019 sur l'industrie minière établit les normes à respecter pour les eaux de traitement des entreprises. Par exemple, selon la directive 019, le pH doit se situer entre 6,0 et 9,5. De plus, l'arsenic doit avoir une concentration moyenne mensuelle maximale de 0,2 mg/l et les cyanures totaux ne doivent pas dépasser 1 mg/l. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2012)

Les différents composés qui peuvent engendrer des conséquences néfastes sur l'environnement, la faune et la flore doivent être gérés par les entreprises minières. Cependant, le caractère instable de certaines réactions comme le DMA et le DNC complexifient la tâche. Plusieurs conditions doivent être réunies afin de générer un drainage toxique, mais lorsque le processus est enclenché il est difficile à arrêter.

Les composés deviennent problématiques quand la concentration dépasse les normes en vigueur et que les molécules se présentent sous une forme biodisponible pour les organismes. Les effluents miniers contiennent différents types de contaminants en fonction du minerai qui est extrait sur le site, des additifs chimiques qui sont utilisés dans le procédé d'extraction et des facteurs environnementaux du site. (Lottermoser, 2010)

La contamination des cours d'eau avoisinants un site minier est associée à l'infiltration d'eau acide, au débordement par crête des ouvrages de retenues ou à l'érosion causée par le vent des résidus secs pour

ne nommer que quelques exemples. Les composants organiques, l'essence ou les lubrifiants industriels utilisés lors des opérations de la mine contaminent aussi l'environnement. (Ritcey, 2005)

2.3 Paysages et communautés

Les impacts sur les communautés et les paysages environnants sont des problématiques qui n'ont commencé à être prises en compte que plus récemment. Les préoccupations des citoyens face à leur milieu de vie sont grandissantes et des questions sur la vie post-fermeture sont soulevées. Les populations désirent se réapproprier les territoires et cela pose de nouveaux défis pour les entreprises.

2.3.1 Impacts sociaux

L'acceptabilité sociale et la conservation du paysage prennent de plus en plus d'importance dans les nouveaux développements miniers. Le rapport avec les communautés sort du cadre opérationnel habituel des mines, mais fait partie intégrante d'une bonne gestion d'entreprise. Les exploitants doivent maintenir de bonnes relations avec les communautés avoisinantes puisque les sites d'exploration et d'exploitation occupent une grande partie du territoire et la production d'importantes quantités de rejets miniers peut causer des problèmes environnementaux et de santé s'ils sont gérés de manière inadéquate. Les entreprises doivent travailler leur image et leur implication communautaire afin de favoriser le dialogue entre les différents partis. Une gestion efficace et sécuritaire des rejets miniers projette une image positive au public.

Au Canada, 12,5 millions d'hectares sont occupés par les haldes de stérile minier correspondant à plus de 6 milliards de tonnes de roches stériles et 7 milliards de tonnages de résidus de concentrateur (Institut du Nouveau Monde, 2012b). Aux mines en opération ou fermées et gérées par les propriétaires s'ajoutent les mines abandonnées. En 2020, 223 sites d'exploration et 221 sites d'exploitations miniers abandonnés étaient recensés sur le territoire et se trouvaient sous la responsabilité du gouvernement québécois. Certaines de ces mines contaminent l'environnement notamment en raison de l'absence de restauration ou d'une mauvaise gestion des rejets. (Shields, 2020)

Le passif des mines abandonnées altère l'opinion sociale lorsque de nouveaux projets sont en cours ou en développement. Certaines techniques de gestion des rejets miniers inquiètent les communautés voisines aux opérations. Plusieurs raisons peuvent être liées à cette inquiétude comme le manque d'information sur la méthode choisie, l'ampleur des travaux et des structures mises en place, la durabilité dans le temps ainsi

que la santé et la sécurité des communautés. La conservation des ressources naturelles du territoire est aussi un aspect important du secteur sociologique.

Certains atouts naturels d'une région font partie de l'histoire des villages et contribuent également au développement du secteur du tourisme. C'est le cas par exemple du réservoir du lac Taureau à côté du village de Saint-Michel-des-Saints. Les rejets miniers de la mine de graphite située en amont du plan d'eau seront gérés par co-disposition. Les citoyens s'inquiètent de la stabilité de l'ouvrage. Également, une potentielle contamination du lac Taureau dû à la présence de soufre dans les rejets ruinerait la grande majorité des revenus de l'industrie touristique de la région. (Riopel, 2020) La contamination des eaux de surface et souterraine est un enjeu qui touche aussi directement la santé des communautés.

Un impact social important est le déplacement des communautés établies afin de débiter ou de poursuivre l'expansion d'une exploitation minière. L'entreprise doit compenser les populations touchées par ce bouleversement social. Lorsqu'une partie de la population est relocalisée et qu'une est intouchée, il faut travailler sur la création de lien avec la communauté. Des tensions peuvent se créer entre les citoyens et l'entreprise, mais également entre les citoyens même. Des insatisfactions sont perceptibles puisque le déplacement d'un ou plusieurs quartiers est une décision qui change le tissu social d'une communauté. Généralement, si une partie de la population doit être relocalisée, les travaux de la mine sont en périphérie des résidences. Les externalités négatives comme le bruit, la poussière et les vibrations, la perte de territoire sont d'autres aspects qui nuisent à la qualité de vie d'une communauté. Par exemple, la relance de la mine Canadian Malartic a nécessité la relocalisation d'une partie d'un quartier afin de permettre à l'entreprise l'exploitation de la mine aurifère située en Abitibi-Témiscamingue (Brisson et al., 2017). La figure 2.3 illustre la proximité de l'exploitation avec les résidences et des citoyens soulèvent une dégradation de leur qualité de vie en raison des externalités négatives mentionnées.



Figure 2.3 Chantier de la mine Canadian Malartic en bordure des résidences (tiré de : Osisko, s. d.)

Cependant, la mise en marche d'une opération minière signifie la relance économique d'une région et est favorable à plusieurs niveaux. La création d'emplois, l'augmentation de la richesse ou la restauration des infrastructures municipales sont tous des côtés positifs apportés par la relance économique. Par contre, certains citoyens disent vivre du stress face aux entreprises et la modification de leur milieu de vie. La perte de l'accès au territoire ainsi que la modification de ce dernier pèsent sur la culture d'une région (Brisson et al., 2017).

Les communautés ressentent parfois un sentiment d'impuissance face aux entreprises minières en particulier au niveau du processus d'installation des structures, de la gestion des opérations et pour la sécurité reliée à la fermeture de la mine. La production et la gestion de rejets miniers apportent des impacts sociaux avant, pendant et après l'exploitation. L'inclusion des communautés autochtones est également importante afin de garantir la reconnaissance et le respect des droits ancestraux. (Institut du Nouveau Monde, 2012a) Le respect des normes environnementales ne garantit pas toujours l'absence de nuisances pour la population avoisinante (Brisson et al., 2017). Le niveau d'acceptation d'un projet varie en fonction de plusieurs facteurs comme la relation de l'entreprise avec la communauté, la confiance établie, les mesures prises pour protéger la population et la réputation de la compagnie minière. Comme l'établissement d'une entreprise cause des changements au sein d'une communauté il faut que les propriétaires soient attentifs aux demandes de la population notamment en termes de stress sur leur qualité de vie (Bouchard-Bastien et al., 2017).

Les défis sociaux se poursuivent même après la fermeture de la mine. Il arrive que des anciens parcs à résidus datant de plusieurs dizaines d'années contaminent l'environnement de plusieurs façons, notamment par le lessivage des eaux de ruissellement. C'est une contamination peu visible, mais au fil du temps, des métaux et des rejets acides se déversent dans les cours d'eau environnants, contaminant ainsi un plus grand territoire. Une diminution de la communauté benthique et de la vie aquatique est observée lorsque la concentration de certains métaux est élevée. Par exemple dans la rivière Massawippi des concentrations de cuivre entre 10 et 75 $\mu\text{g/l}$ sont détectés et le critère pour la protection de la vie aquatique est de 2,33 $\mu\text{g/l}$. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2003) Cet exemple alimente les craintes des citoyens envers la gestion des parcs à résidus miniers, autant pour les sites abandonnés que pour les sites actifs.

2.3.2 Paysages

L'extraction et l'entreposage des rejets miniers changent le paysage du territoire. L'ampleur des parcs à résidus et des fosses dépend du type d'exploitation, du minerai extrait ainsi que des techniques de traitement utilisées (Simard, 2018). Chaque année au Québec, 100 millions de tonnes de rejets de solides sont produits (Institut du Nouveau Monde, 2012b). Les sites miniers peuvent être situés au milieu d'une forêt, mais aussi parfois pratiquement au centre d'une ville comme c'est le cas de la mine Jeffrey à Val-des-Sources (figure 2.4).



Figure 2.4 Site d'exploitation de la mine Jeffrey et la ville construite en périphérie des installations
(tiré de : Barra de Vincenzo, 2011)

La cour de certaines résidences donne directement sur les haldes de stérile minier. Le paysage de la ville est forgé par la mine.

La quantité et la nature des rejets miniers peuvent réduire certains usages du territoire post-fermeture (Institut du Nouveau Monde, 2012a). Par exemple, les anciens sites contenant des résidus toxiques comme l'amiante peuvent se voir refuser certains projets à caractère touristique à la suite de la re végétalisation du site. Les compagnies minières doivent donc prendre en considération l'avenir du site après la fermeture, afin de développer un plan de restauration qui permette aux citoyens de reprendre possession du territoire dans des conditions sécuritaires.

Le paysage minier est également composé d'aménagements connexes comme les infrastructures de traitement et les routes d'accès. Ces constructions peuvent causer la modification du paysage. L'utilisation du territoire dans des buts culturels ou récréatifs peut également être compromise. (Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire et Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016) Une fragmentation du territoire a aussi des impacts négatifs au niveau de la survie de certaines espèces comme le caribou forestier, classé comme espèce vulnérable au Québec, qui dépendent de différents habitats pour se nourrir et se reproduire (Institut du Nouveau Monde, 2012b).

2.4 Coûts

La gestion des rejets miniers nécessite un investissement important des entreprises minières. Les coûts réels pour la gestion des stériles et des résidus miniers sont difficilement disponibles. Certaines méthodes permettent d'obtenir des coûts à la tonne ou à l'hectare pour certaines techniques de gestion ou de restauration, mais le montant total requiert une évaluation préliminaire des méthodes jusqu'au suivi post-fermeture. Ces informations sont souvent peu communiquées par les entreprises. Les capex (*capital expenditure*) qui sont les dépenses d'investissements représentent les coûts de mise en place pour les méthodes de production et de gestion des rejets miniers. Les opex (*operational expenditure*) qui sont les dépenses d'exploitation représentent les charges courantes que devront déboursier les mines pour la réalisation de la gestion des rejets selon la ou les méthodes choisies. Les coûts de gestion des rejets miniers sont souvent présentés en termes de dollar, mais il existe d'autres types de coûts associés qui ne se chiffrent pas de la même manière. Les coûts sociaux ou environnementaux doivent également être pris en compte lors de l'évaluation complète du projet. La perte de vies humaines ou la disparition d'espèces protégées sont des aspects aussi importants que les dollars associés à la construction d'ouvrages de retenues. Les différentes sources présentées à la figure 2.5 démontrent l'ampleur des répercussions que peuvent avoir les rejets miniers.

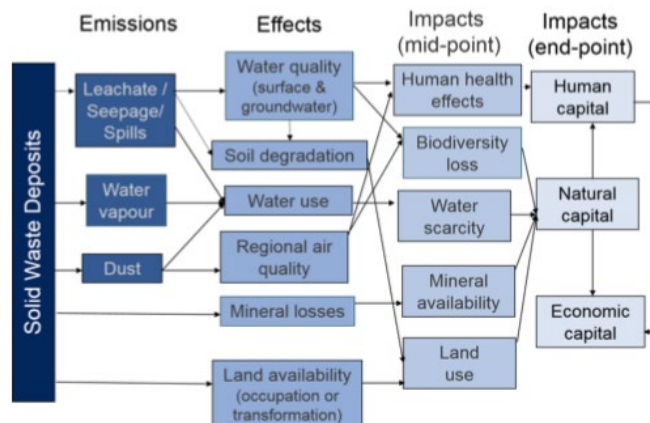


Figure 2.5 Secteurs affectés par les émissions produites par les rejets miniers. Les impacts sont regroupés/classés selon trois grands secteurs soit le capital social, l'environnement et le capital économique affectant ainsi l'entièreté de la chaîne (tiré de : Broadhurst et al., 2019, p.11)

La gestion des rejets miniers se répercute de différentes façons sur plusieurs sphères qui sont interconnectées comme la santé humaine, la biodiversité ou l'occupation du territoire. Selon la figure 2.5, le capital humain, environnemental et économique est affecté par la production et la gestion des rejets miniers.

2.4.1 Coûts environnementaux

La gestion et l'entreposage des rejets miniers influencent les écosystèmes autour des sites. La qualité de l'air est influencée par les activités de transport et de dynamitage. Des particules sont rejetées dans l'atmosphère et l'utilisation des véhicules et des génératrices émet des polluants, du monoxyde de carbone et d'autres composés néfastes pour la faune, la flore et les communautés voisines. L'excavation et le transport du mort terrain et des matériaux pour l'exploitation, la création de fosses, les aires d'entreposages et les ouvrages de retenues perturbent les communautés végétales locales. La destruction d'habitats peut entraîner la disparition d'aires de reproduction et de corridors fauniques. De plus, la contamination par les métaux menace la faune, la flore ainsi que la qualité de l'eau de surface et souterraine environnantes. (Environnement Canada, 2009) Tous ces effets mènent également à des impacts sur la vie humaine (figure 2.6). Le coût environnemental se mesure en perte d'habitat pour la faune et en une diminution de la richesse des écosystèmes. Les compagnies minières doivent respecter plusieurs règlements afin de maintenir une qualité environnementale satisfaisante sur leur site d'exploitation. Les entreprises qui enfreignent la réglementation environnementale doivent payer des amendes. Par exemple, *Cliff Natural Resources* a dû verser 7,5 millions de dollars d'amende suite à diverses infractions entre 2011 et 2014. En

plus d'avoir rejeté 14 500 litres de sulfate ferrique dans le lac Mazaré près de Fermont, la compagnie avait mal conçu son parc à résidus miniers qui s'est effondré relâchant 200 000 mètres cubes de résidus de concentrateurs dans l'environnement. (Lévesque, 2014)

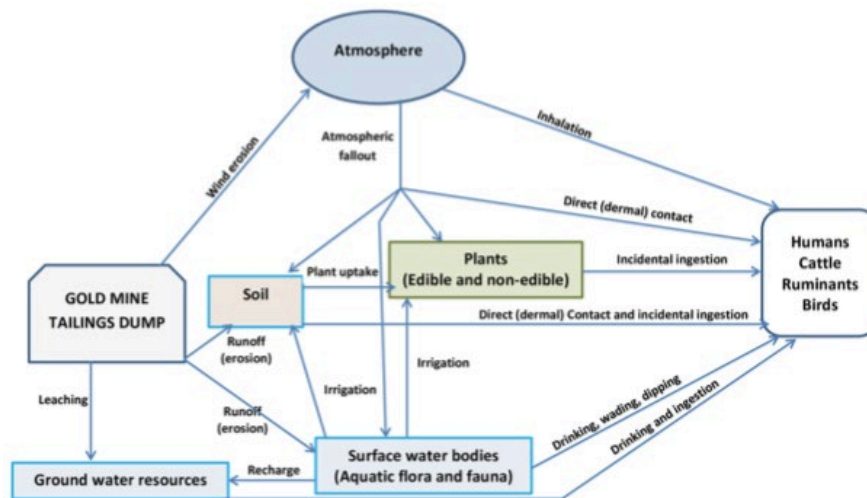


Figure 2.6 Liens entre les différentes sphères environnementales et leur type d'interaction (tiré de : Broadhurst et al., 2019, p.17)

Les coûts environnementaux comprennent aussi la contribution des entreprises minières à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) (Institut du Nouveau Monde, 2012). L'extraction minérale exige en effet une utilisation de véhicules lourds et lorsque les mines sont en territoires éloignés, l'utilisation de génératrices ou centrales thermiques fonctionnant au diesel. Les usines de transformations contribuent également à l'apport en gaz à effet de serre (Institut du Nouveau Monde, 2012). Les émissions directement attribuables au secteur minier représentaient 0,8 % de toutes les émissions au Canada en 2016. Comme le coût environnemental de la production de gaz à effet de serre est aussi lié à des dépenses pour le maintien des activités comme la consommation d'essence, de plus en plus de minières investissent dans ce secteur afin de réduire le coût. La diminution de la production de GES par des changements de pratiques permet aussi aux compagnies d'économiser. Comme la consommation d'énergie est la principale source de dépenses, les compagnies investissent dans les énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien et le photovoltaïque. Rio Tinto a ainsi investi 31 millions de dollars dans la construction d'un parc éolien sur les Territoires du Nord-Ouest du Canada. La mine Raglan dans le nord du Québec utilise une éolienne permettant d'économiser 2,1 millions de litres de diesel et de réduire les émissions de 5,85 kilotonnes. Sur 20 ans, la compagnie prévoit réaliser des économies de l'ordre de 40 millions de dollars. (Association minière du Canada, 2018)

2.4.2 Coûts sociaux

Les coûts sociaux se définissent de plusieurs façons. L'acceptabilité sociale et la confiance des citoyens envers une entreprise sont essentielles au développement et au bon fonctionnement d'un projet. Les compagnies minières investissent dans les communautés autour des chantiers afin de répondre aux attentes des citoyens avant, pendant et après l'exploitation. La qualité de vie des gens est bousculée par des exploitations d'une telle envergure. Il est important d'investir dans la communauté pour bâtir une relation puisque les citoyens seront toujours présents même après la fermeture de la mine. Lorsque les projets sont mal présentés ou imposés aux citoyens, des confrontations peuvent retarder la mise en chantier des projets et les retards occasionnés et mesures d'apaisement et de compensation peuvent devenir coûteux pour les entreprises.

Les sites miniers ont un impact significatif sur les communautés, parfois situées loin des sites. En Afrique du Sud par exemple, de nombreuses exploitations de charbon, d'or, de platine et de diamant sont dispersées sur tout le territoire. Les activités minières influencent directement 84 communautés différentes soit 5,4 millions de personnes. Ceci inclut les grandes villes qui se développent à proximité des sites miniers, mais aussi les petites villes minières qui existent pour la mine et les villages qui existaient avant l'établissement de l'exploitation et qui sont influencés par les activités à différents degrés sont aussi très impactées. (Cole et Broadhurst, 2020) Quand une décision est prise au niveau de la gestion des activités, les propriétaires doivent considérer toutes les communautés concernées.

La rupture des digues et les incidents sur les sites peuvent avoir des conséquences environnementales importantes, mais aussi affecter directement la sécurité des travailleurs et des communautés vivant à proximité. Malheureusement, la perte de vie humaine est un coût social qui fait partie des incidents. La rupture du barrage de *Brumadinho* dans l'état de Minas Gerais au Brésil en 2019 a fait plus d'une centaine de morts. Suite à des procès, les activités de la minière ont été suspendues et la compagnie a dû payer des amendes. Ces morts et ce coût social ont amené les différents investisseurs à demander un système de classification public indépendant et mondial pour la surveillance des différences barrages miniers. Les ruptures de barrages ont coûté la vie à des milliers de personnes depuis le début de l'exploitation minière. Aujourd'hui, les investisseurs posent beaucoup de questions sur la gestion des risques avant de devenir partenaires. (Rolfe, 2019)

À Kiruna en Suède, la ville de 18 000 habitants doit être déplacée en entier de 4 km vers le nord-ouest suite à des failles provoquées par les opérations de la plus grosse mine de fer au monde. La mine est plus que centenaire et l'exploitation du minerai s'est développée plus rapidement que prévu. L'objectif est de

déplacer les maisons, la voie ferrée, les autoroutes, les réseaux électriques et la canalisation afin de reconstruire la ville. Le chantier va se poursuivre jusqu'en 2099. Bien que seulement 10 % de la population travaille pour la mine, la plupart des citoyens voient le déplacement comme nécessaire. (Larson, 2009) Au Québec, la corporation minière Osisko qui a dû déplacer 205 résidences pour l'exploitation de la mine Canadian Malartic. Chaque citoyen relocalisé a reçu 5000 dollars de compensation en plus d'une nouvelle habitation. Dans l'optique de la mise en marche du chantier et de l'élaboration du lien de confiance avec la population, Osisko a investi 82 millions de dollars, organisé 19 rencontres publiques et reconstruit 5 bâtiments institutionnels. (Fontaine, 2008)

Les coûts sociaux associés à l'exploitation minière et à la gestion des rejets miniers sont difficiles à chiffrer. Ces coûts ne sont pas toujours mesurables, mais les entreprises devront déboursier davantage si la relation de confiance et la sécurité des citoyens sont compromises.

2.4.3 Autres investissements

Le coût de la restauration des sites miniers abandonnés au Québec était estimé à 1,25 milliard de dollars en 2012 pour 679 sites (Institut du Nouveau Monde, 2012). Le coût de restauration d'un site minier abandonné varie énormément. Chaque site est unique et une même méthode va avoir un coût différent d'un site à l'autre en fonction du type de rejet, de la topographie et de plusieurs facteurs propres à chaque site. Une méthode simple pourrait coûter 17 000 \$/ha et une méthode plus complexe entre 30 à 100 000 \$/ha (Bussière et al., 2005). Dans tous les cas, la somme à investir pour restaurer un site abandonné ou en opération est importante. Les entreprises doivent prévoir dans le budget initial le coût de la gestion des rejets et de la restauration, soit de mettre en banque l'entièreté des coûts dans les trois premières années (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2017). Cet investissement est souvent vu par les entreprises comme un poids financier puisque les investissements à faire n'apportent pas de retour financier (Broadhurst et al., 2019).

Le dépassement des coûts pour la gestion des rejets miniers et le respect des normes environnementales est commun pour plusieurs entreprises minières. Par exemple, le projet minier de Matawinie devrait générer 107 Mt de rejets miniers qui seront gérés avec une méthode de co-disposition dans la fosse et sur des aires d'entreposage. Le ministère de l'Environnement et de la lutte aux changements climatiques s'est dit positif à la stratégie de gestion, mais a demandé des améliorations supplémentaires et des suivis serrés.

Le projet d'agrandissement de la fosse et des aires d'entreposages des rejets miniers de la mine Canadian Malartic est un autre exemple de dépassement des coûts initiaux. Le projet d'agrandissement entraînera la génération de 418 Mt supplémentaires de rejets miniers. Les aires d'accumulations actuelles doivent être rehaussées et prolongées. Les investissements massifs comprennent aussi une modification de la gestion des eaux puisque les débits à rejeter dans l'environnement sont dix fois grands qu'envisagé au départ. (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2016)

Pour les entreprises, il y a des coûts prévus et non prévus avant, pendant et après l'exploitation d'un site. La portion qui concerne la gestion des rejets miniers est importante et des impacts financiers sont à prévoir pour la majorité des secteurs entourant le site d'exploitation à court et à long terme. Plus l'analyse des coûts et la planification sont réalisées tôt, plus la gestion financière est facilitée.

Des nouvelles approches de gestion permettent de répondre aux principales problématiques présentées dans la section 2. Il existe de multiples options pour les entreprises afin d'effectuer une gestion qui va limiter les externalités négatives.

3. MÉTHODES DE GESTION INTEGREE

Il existe de nombreuses approches de gestion des rejets miniers. Les méthodes sont en constante évolution et permettent de répondre de mieux en mieux aux différents défis présentés dans le chapitre 2. Dans le cadre de cet essai, une sélection de méthodes existantes les plus innovantes et les plus prometteuses a été effectuée.

3.1 Désulfuration environnementale

La désulfuration environnementale vise à séparer les minéraux sulfureux (responsables de la génération de DMA et de DNC) du reste de la gangue. La technique est étudiée depuis les années 90 et s'est révélée efficace au laboratoire (petite échelle) et sur le terrain (installations pilotes). Pour déterminer si les rejets seront problématiques, il est possible de les évaluer avec le ratio NP/AP c'est-à-dire le potentiel de neutralisation sur le potentiel d'acidité. Il existe une zone d'incertitude dans laquelle les rejets pourraient générer de l'acide comme ils pourraient posséder un potentiel de neutralisation assez élevé pour éviter cette problématique. (Bussière, 2007)

La désulfuration environnementale est un procédé de traitement qui s'inscrit dans une gestion intégrée des rejets miniers (Bussière, 2007). La désulfuration par flottation permet de retirer les sulfures des résidus miniers. Ce procédé génère deux types de fractions, d'une part un concentré très riche en sulfure (et donc très fortement générateur d'acide) et de l'autre un résidu pauvre en sulfure (donc non générateur de drainage contaminé) (Hesketh et al., 2010). Cette séparation va permettre de réduire le volume de rejets problématiques à entreposer (notamment en surface dans les aires d'accumulation) (Bussière, 2007; Derycke, 2012). Cette méthode est particulièrement adaptée pour les exploitations qui sont en mesure d'ajouter un circuit de flottation (figure 3.1) à la fin du système de traitement existant (Benzaazoua et al., 2008). La figure 3.1 montre les différents chemins que prennent les deux fractions suite au traitement soit sous forme de pâte pour le concentré de sulfure vers un entreposage spécifique (*underground paste backfill*) et pour la fraction désulfurée, il y a trois avenues présentées sur le schéma (*Paste backfill plant, tailing impoundment et cover material*).

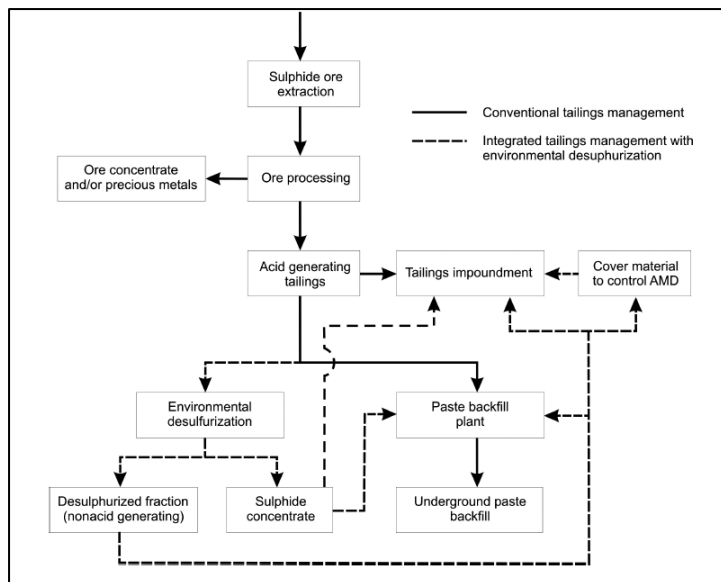


Figure 3.1 Intégration d'un circuit de désulfuration dans le procédé de traitement (tiré de : Bussière, 2007, p.1035)

La flottation est une technique qui consiste à disperser des bulles d'air avec des particules solides en suspension dans une solution aqueuse. La technique la plus employée est le procédé de flottation des sulfures en vrac c'est-à-dire de façon non sélective sur les minéraux sulfureux. Jusqu'à 95 % des sulfures peuvent être récupérés lorsque les pulpes du concentrateur sont fraîches. La désulfuration environnementale s'applique bien sur les rejets polymétalliques comme les résidus de mines de plomb, de zinc, de cuivre ou de nickel (Aubertin et al., 2016). Certaines particules sont naturellement hydrophobes et d'autres rendues hydrophobes artificiellement par l'ajout de collecteurs spécifiques. Les particules hydrophobes s'accrochent aux bulles et le tout est recueilli à la surface dans l'écume. (Derycke, 2012) Les xanthates à chaînes longues sont des collecteurs fréquemment utilisés pour la désulfuration (Aubertin et al., 2016). Les xanthates se fixent sur les composés de sulfures par leur groupement polaire soufré en plus de créer un film hydrophobe à l'aide d'une chaîne d'hydrocarbures saturée (alkyle). Les collecteurs ont tendance à former des précipités solides en présence de métaux comme le fer, le cuivre, le zinc, ce qui peut parfois les rendre indisponibles pour s'accrocher aux sulfures. (Derycke, 2012)

L'efficacité de la désulfuration environnementale dépend de plusieurs paramètres comme la chimie de la solution et la surface des sulfures, mais aussi du type de réactifs, et la concentration des collecteurs et des agents moussants. L'efficacité est aussi influencée par la granulométrie des rejets de concentrateurs et par la fraction argileuse. (Aubertin et al., 2016) Pour les particules plus grossières, la turbulence dans le bassin doit être assez élevée pour permettre leur mise en suspension et favoriser une collision entre les bulles et les particules. L'ajout de réactifs moussants permet de diminuer les tensions de surfaces et de stabiliser les

bulles, améliorant ainsi la stabilité de la mousse formée. (Derycke, 2012) La cinétique de flottation des sulfures dépend de la récupération visée ainsi que de la composition minéralogique des rejets. La surface des sulfures est très sensible aux changements de pH ainsi qu'à l'ajout de réactifs comme des activateurs, utilisés pour faciliter l'absorption, ou des déprimants, utilisés pour inhiber l'absorption. Le temps de flottation requis est le temps qui permettra de retirer une quantité suffisante de sulfures pour que la portion désulfurée soit non génératrice de drainage minier acide.

D'autres types de collecteurs peuvent être utilisés comme les thiocarbamates, les mercaptobenzothiazoles ou les amines, mais ils sont moins adaptés à la désulfuration environnementale puisque plus coûteux et plus lents. (Benzaazoua et al., 2000) Certains réactifs présents dans la pulpe peuvent poser des défis techniques comme la présence de chaux ou de cyanure. Leur présence peut entraîner une passivation de la surface des sulfures en déprimant leur surface ce qui freine leur concentration par les collecteurs (Derycke, 2012). Le temps de flottation ainsi que le dosage des collecteurs à ajouter à la solution sont des paramètres particulièrement critiques.

Le concentré de sulfures est souvent intégré aux remblais en pâte cimentés, ce qui apporte une solidité aux structures en réduisant les risques de drainage minier acide (voir aussi section 3.2). Cette approche permet aussi de réduire la quantité de rejets problématiques devant être déposés en surface. Les résidus désulfurés peuvent servir de matériel de construction pour les infrastructures du site, et notamment les recouvrements (Bussière et al., 2003; Demers et al., 2009).

Des approches modernes, respectant l'environnement et différentes des méthodes conventionnelles, comme la désulfuration environnementale, ne seront mises en place que si les gains sont suffisamment importants pour compenser les coûts d'implantation. Les coûts totaux de la désulfuration environnementale incluent les coûts de capitaux (achats des équipements comme les cellules de flottation, les pompes et les turbines), les coûts d'installations, et les coûts d'opération. En 2000, l'évaluation des coûts de cette technique sur quatre mines canadiennes variait entre 0,1\$/tonne et 0,4\$/tonne de rejets. (Benzaazoua et al., 2000)

Une des difficultés techniques rencontrées avec la désulfuration environnementale est la capacité de séparation des sulfures dans des résidus qui contiennent de nombreux chimiques. La présence de certaines molécules crée de l'interférence avec le procédé ce qui diminue l'efficacité de la technique. (Benzaazoua et al., 2008) Une autre problématique technique se présente lorsque les résidus à traiter sont très acides et possèdent un potentiel de neutralisation faible. Le niveau de désulfurisation obtenu par la technique pourrait dans ce cas ne pas nécessairement permettre d'obtenir des résidus non générateurs d'acide. Pour pallier

cette difficulté, il est possible d'ajouter au mélange des rejets qui ont un fort potentiel de neutralisation comme certains rejets miniers ou du matériel calcaire naturel. (Bussière, 2007)

L'utilisation de la désulfuration environnementale permet d'augmenter le potentiel net de neutralisation des rejets miniers, et de favoriser une meilleure gestion des deux portions obtenues. (Bussière, 2007) Dans l'ensemble, la méthode contribue à diminuer les coûts de gestion et de restauration des sites (Benzaazoua et al., 2000). Il est possible d'appliquer une couche de rejets miniers désulfurée sur des rejets générateurs de DMA en maintenant un niveau d'eau près de la surface des rejets réactifs et sous la couche de rejets désulfurés. Cette configuration est différente de la méthode conventionnelle de recouvrement par l'eau qui est utilisée pour la gestion de ce type de rejets. La configuration proposée permet de contrôler le DMA en plus de diminuer le lessivage du zinc et du nickel par 87 % et 98 % dans certains cas. (Demers et al., 2008) La quantité de rejets problématiques est moindre ce qui réduit les risques de drainage minier associés et permet une revalorisation.

La mine Doyon en Abitibi-Témiscamingue avait une problématique de capacité avec ses parcs à résidus miniers. Puisque les résidus de la mine sont générateurs de drainage minier acide, la gestion était complexe et coûteuse. La désulfuration environnementale a été ajoutée au procédé de traitement de la mine. La fraction sulfur e du processus est envoyée sous terre pour être mélangée aux remblais cimentés. La portion pauvre en sulfure sert de matériel pour la fermeture de la mine. (Benzaazoua et al., 2008)

La mine Raglan au Nord-du-Québec extrait du nickel. La pyrrhotite est le sulfure retrouvé en plus grande quantité dans les rejets de la mine. La désulfurisation environnementale par flottation non sélective sur les résidus de la mine pourrait permettre de faciliter la gestion de rejets problématiques. Plus de 95 % de la pyrrhotite est retirée des rejets grâce à l'utilisation de cette méthode. La portion désulfurée est utilisée comme matériel de recouvrement pour le reste des résidus générateurs de DMA et la portion sulfur e est envoyée dans les pâtes de remblais. L'ajout du procédé de traitement par DE à permet de traiter plus de 70 % des rejets. (Benzaazoua et al., 2017) C'est un exemple qui démontre que cette méthode est valide dans un climat extrême comme le Nord-du-Québec.

La désulfurisation permet donc de produire deux types de fractions qui sont utilisés pour d'autres techniques de gestion. Dans la littérature, cette technique est souvent présentée conjointement avec d'autres puisque la nature des rejets obtenus est utile à des fins différentes.

3.2 Remblais

Les opérations minières perturbent/altèrent le paysage entre autres par l'accumulation des rejets miniers en surface et par la création de fosses. Le règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel stipule une taxe sur les rejets miniers entreposés en surface. Le montant annuel que doivent déboursier les entreprises varie en fonction de la quantité de rejets et de la toxicité de ceux-ci. Le remblayage permet de diminuer le coût de cette taxe. (*Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel*) Le remblayage permet de diminuer la quantité de matériel en surface tout en utilisant le matériel disponible pour améliorer la stabilité physique des structures et diminuer les risques de contamination environnementale. Il existe deux types de remblayage : le remblayage souterrain et le remblayage de fosses.

3.2.1 Remblai souterrain

Le remblayage souterrain est une technique qui existe depuis plusieurs dizaines d'années, mais qui a fait l'objet de nombreuses recherches durant les années 2000 afin d'optimiser la méthode. L'objectif premier est de stabiliser les galeries pour récupérer les piliers. Il existe trois types de remblais soit le remblai rocheux, le remblai hydraulique et le remblai en pâte cimentée. (Demers et Pabst, 2020)

Le remblai rocheux est constitué de stériles miniers, parfois mélangés avec une pâte cimentaire lorsqu'il faut obtenir une résistance particulière. Les roches sont transportées par des camions ou des convoyeurs jusqu'aux chantiers souterrains. La résistance mécanique et la résistance en compression de ce mélange sont plus élevées que celui des autres types de remblais. Le taux de remblayage est de 100 à 400 tonnes par heure. (Chou, 2012)

Le remblai hydraulique est constitué de rejets de concentrateurs, d'eau et de liants hydrauliques. Le transport se fait généralement via des conduites. Certains problèmes de séparation/ségrégation lors du tassement peuvent se produire en raison des quantités importantes d'eau contenues dans le remblai hydraulique. La résistance est faible, mais c'est un remblai facile d'utilisation et peu dispendieux. Le taux de remblayage est de 100 à 200 tonnes par heure. (Chou, 2012)

Le remblai en pâte cimentée est le type de remblai le plus utilisé et le plus étudié pour les mines souterraines. C'est un mélange constitué de résidus de concentrateurs préalablement densifiés avec une teneur en solide entre 75 % et 85 %. Des liants hydrauliques composés de plusieurs réactifs sont ajoutés

au mélange afin de générer de la cohésion lors de la cimentation. Une faible quantité d'eau est ensuite rajoutée pour atteindre une concentration de solides entre 70 % et 80 %. Chaque proportion des composantes du mélange est importante pour obtenir une stabilité chimique et physique à long terme. (Benzaazoua et al., 2004)

Les liants hydrauliques utilisés pour la cohésion du mélange doivent donner un niveau de support suffisant pour contribuer à la stabilité physique des ouvertures souterraines et permettre aux travailleurs d'être en sécurité. Le remblayage souterrain permet de récupérer les piliers existants ce qui permet d'augmenter la production en plus de réduire les quantités de rejets entreposées à la surface. Les ciments Portland, des liants hydrauliques composés de silicates de calcium, sont largement utilisés pour cette méthode de remblais. Les autres types de liants utilisés comme les ciments de laitier ou les cendres volantes proviennent du recyclage d'autres industries, ce qui fait partie d'une économie circulaire plus large. L'eau utilisée peut être fraîche ou recyclée d'un processus antérieur. (Benzaazoua et al., 2004)

Les résidus en pâtes qui sont utilisés pour les mines souterraines ont une viscosité élevée ce qui nécessite une optimisation du mélange au laboratoire afin que le mélange puisse être transporté dans les pipelines. Lorsque le remblai est déposé dans un chantier souterrain afin de combler l'espace vide et renforcer les autres structures, les conditions de stress initial ainsi que la géométrie du chantier doivent être prises en compte dans le développement de la recette de mélange. (Belem et Benzaazoua, 2008)

La technique des résidus en pâte est utilisée fréquemment dans les mines au Canada. Au fur et à mesure que les opérations avancent, le remblai en pâte est placé dans les sections de chantiers qui ne sont plus utilisées par les mineurs. Cette méthode permet d'avoir une plate-forme stable pour les travailleurs sur les niveaux supérieurs et offre un support pour les murs adjacents en réduisant la quantité d'espace ouvert. De plus, les agents hydrauliques ajoutés à la pâte permettent à cette dernière de garder une certaine solidité lorsque des sections de remplissage sont exposées lors de travaux sur des sections adjacentes. (Belem et Benzaazoua, 2008)

L'utilisation de remblais en pâte permet aussi de stabiliser les contaminants qui se trouvent dans certains types de résidus. Les liants hydrauliques qui sont ajoutés lors de la fabrication du mélange peuvent réagir avec certains métaux et les métalloïdes afin de créer des composés plus stables. Par exemple, l'arsenic dans un résidu en pâte peut se lier avec le calcium pour créer de l'arséniate de calcium. Cependant, le comportement à long terme de ce type de composé est incertain. Ainsi, le lessivage de l'arsenic dépend du liant hydraulique utilisé (Coussy et al., 2012). Surtout, la cimentation permet d'isoler les minéraux sulfureux et de limiter leur contact avec l'oxygène, réduisant ainsi les risques d'oxydation et de génération de DMA.

Malgré les nombreux développements technologiques, entre 2003 et 2006, 12 effondrements de remblais en pâte ont été rapportés dans le monde. Ces incidents ont entraîné des retards de production et des coûts supplémentaires pour les entreprises. (Helinski et al., 2011) Certains résidus contiennent des minéraux sulfurés ayant une proportion de 1 à 70 %. La réactivité des sulfures peut être évaluée à l'aide du test de la consommation en oxygène. (Ouellet et al., 2006)

Les principaux avantages du remblayage sont la diminution des volumes de résidus en surface, particulièrement ceux qui génèrent du DMA. Les compagnies vont préférentiellement utiliser les résidus réactifs ou le concentré de sulfure issu de la désulfuration dans le mélange de remblai. Les risques de contamination sont donc contrôlés. De plus, la stabilité amenée par le remblayage souterrain permet la continuité des opérations en plus d'assurer la sécurité des travailleurs. Les prix des agents hydrauliques sont le facteur économique le plus important de la technique. En 2004, le coût du liant était de 1\$US/tonne de résidus en pâte. Comme les agents hydrauliques sont essentiels au bon fonctionnement la méthode, aucune optimisation économique ne devrait amener à réduire la quantité d'agents utilisés. (Benzaazoua et al., 2004)

3.2.2 Remblai en fosse

Le remblayage des fosses vise à utiliser l'espace formé lors des opérations d'extractions en surface pour l'entreposage des rejets miniers. La méthode peut se faire de façon séquentielle en cours d'opérations lorsque la mine a plus d'une fosse ou à la fin des opérations. Dans le premier cas, les rejets sont utilisés pour remplir une ancienne fosse avec du matériel qui provient d'une fosse en exploitation. Dans le second cas, il faut attendre que les opérations d'extraction soient terminées. Le remblayage des fosses permet de diminuer les coûts de fermeture en utilisant une structure de confinement déjà existante sur le site et ainsi réduire les risques d'instabilités puisqu'il n'y a plus de digues. Un autre objectif de cette technique est de couvrir et submerger les résidus de façon permanente afin de minimiser les risques d'oxydation à long terme. Les fosses remblayées sont cependant connectées aux écoulements d'eaux de surface et souterraines et il pourrait y avoir des impacts potentiels sur l'eau consommée par la population, la vie aquatique, la vie sauvage environnante ainsi que sur les activités récréatives si une contamination survient. (Johnson et Carroll, 2007)

Les paramètres hydrogéologiques de la fosse, le climat, le taux de déposition ainsi que la vitesse à laquelle la fosse se remplira, sont autant de paramètres à prendre en compte pour la conception de la méthode. De plus, la stabilité physique des murs de la fosse doit être étudiée puisque durant les opérations minières les

murs peuvent devenir instables. Une caractérisation des murs de la fosse est aussi nécessaire afin de déterminer si les roches qui sont exposées le long des parois pourraient générer de l'acide. (Mine Environment Neutral Drainage, 2015) Sur la figure 3.2, est illustré les différentes composantes d'un profil de fosse.

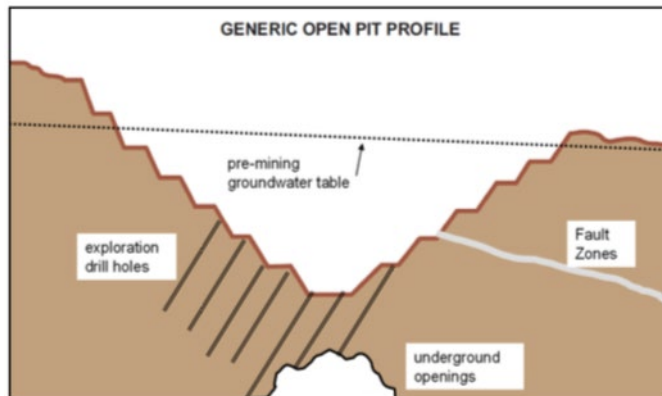


Figure 3.2 Profil d'une fosse suite à l'extraction du minerai (tiré de : Mine Environment Neutral Drainage, 2015, p.5)

L'ajout des rejets miniers dans la fosse est une opération qui se planifie dès le début des travaux. Malgré la taille de la fosse, tous les rejets ne pourront pas nécessairement y être déposés en raison du de l'augmentation du volume des rejets lors du concassage et du broyage. Les entreprises doivent prévoir des lieux d'entreposage temporaires sécuritaires en attendant de pouvoir envoyer les stériles dans la fosse. Les résidus de concentrateurs peuvent être déposés par gravité dans la fosse. Les résidus vont se consolider dans le fond et l'eau contenue dans le mélange initial va former une couverture d'eau, protégeant ainsi les rejets de l'oxygène. Les résidus peuvent aussi être déposés sous forme de pâte afin d'éviter la séparation des particules et de maximiser la consolidation. (Mine Environment Neutral Drainage, 2015)

La technique du remblayage complet de la fosse implique l'ajout d'une quantité importante de matériel. Une fois que les résidus sont déposés, l'eau de la nappe phréatique ainsi que des précipitations va se stabiliser. Des amendements alcalins peuvent être ajoutés afin de neutraliser l'acide généré par des résidus sulfurés. (Johnson et Carroll, 2007)

La méthode de remblayage de la fosse est une technique est intéressante au niveau des coûts-bénéfices ainsi que pour la stabilité. La pollution de l'air est minimisée en plus de diminuer l'occupation des surfaces environnementales. Les risques d'effondrements sont aussi réduits au maximum. Il reste tout de même des

enjeux potentiels comme la génération d'acide malgré tout, le lessivage de sel ou de métaux lourds dans l'eau souterraine ou en surface. (Park et al., 2017)

3.3 Densification

La gestion conventionnelle des rejets de concentrateur consiste généralement à les transporter et les déposer sous forme liquide ou en pulpe avec une concentration de solides entre 25 et 60 % en fonction des étapes du procédé de traitement. Les ouvrages de retenues conventionnels présentent plusieurs défis au niveau de la stabilité physique et chimique de l'entreposage des résidus à long terme. De plus, la quantité d'eau requise dans les étapes de procédé et pour l'entreposage des résidus est un enjeu dans certaines régions du monde lorsque le climat est aride, les sources sont protégées et les milieux sont plus fragiles. (Davies, 2011)

La technique de densification des résidus permet de répondre en partie à ces enjeux. En retirant une partie de l'eau des résidus, leurs propriétés mécaniques (densité, résistance au cisaillement) augmentent.

Il existe plusieurs niveaux de densification des résidus. Les trois catégories de densification les plus communes sont les rejets épaissis (*Thickened tailings*), les résidus en pâte (*Paste tailings*) et les résidus filtrés (*Filtered tailings*) (figure 3.3). Plus le matériel est déshydraté, plus les résidus se comportent comme un solide et moins ils nécessitent d'ouvrage de retenue. L'aspect physique des résidus densifiés varie significativement selon le niveau de densification (figure 3.3). La technique des résidus filtrés est celle qui déshydrate le plus.



Figure 3.3 Différentes techniques de densification des résidus passants d'un état liquide à solide
(tiré de : Demers et Pabst, 2020, p.322)

3.3.1 Rejets épaissis

L'épaississement des résidus consiste à augmenter la teneur en solides autour de 45 à 70 % (les résidus conventionnels ont généralement une teneur en solide inférieure à 45 %). Le but premier de cette technique est d'améliorer leur comportement géotechnique. (Demers et Pabst, 2020) Suite à l'épaississement, les résidus se comportent davantage comme des fluides visqueux et non comme des particules en suspension dans une solution. L'homogénéité et la densité des résidus épaissis sont plus élevées que les résidus conventionnels (Bussière, 2007).

Les résidus sont épaissis au moyen d'épaississeurs dont le diamètre varie de quelques mètres à plus de 100 mètres de diamètre. Des flocculants peuvent être ajoutés au procédé afin d'accélérer la sédimentation des résidus. Les résidus sont ensuite pompés vers les lieux d'entreposage. (Bussière, 2007). Les résidus épaissis possèdent une vitesse d'écoulement critique, mais ne se séparent pas lors de la sédimentation (Demers et Pabst, 2020).

Les résidus épaissis peuvent être déposés depuis les digues des parcs ou depuis une tour centrale afin de former une structure conique (Bussière, 2007). Les pentes générées varient entre 0,5 % et 4 %, mais sont généralement autour de 3 % pour les résidus épaissis (Simms, 2017).

Les propriétés géotechniques des résidus épaissis sont améliorées lorsqu'ils sont déposés en couche mince. La consolidation de la structure se fait naturellement par le poids des différentes couches au cours du temps. Les conditions météorologiques peuvent également contribuer à assécher les résidus et ainsi à renforcer l'empilement et augmenter la consolidation. (Bussière, 2007)

3.3.2 Résidus en pâte

La technique de la déposition en surface des résidus en pâte est inspirée des remblais souterrains développés dans les années 1970 (Demers et Pabst, 2020). Les résidus en pâte sont denses et ne se séparent pas au repos. Des épaississeurs à haute densité sont généralement utilisés afin d'augmenter la concentration des solides autour de 60 à 70 %. La matière est ensuite transportée dans une autre structure où une quantité d'eau y est ajoutée afin d'obtenir la consistance désirée. (Bussière, 2007)

La pâte est dite thixotropique puisque ces propriétés d'écoulement varient avec le temps. Elle va se consolider comme une solide, mais lorsque soumise à de fortes contraintes, elle va agir comme un fluide visqueux. La résistance au cisaillement des résidus en pâte est plus élevée que celle des résidus conventionnels ou épaissis (figure 3.3). (Bussière, 2007)

L'ajout de liants peut augmenter la résistance de la pâte ainsi que les propriétés de résistance au cisaillement et de rétention d'eau. L'ajout de liants permet aussi de stabiliser les contaminants qui se trouvent éventuellement dans les résidus. (Bussière, 2007) Les résidus en pâte n'ont pas de limite d'écoulement critique et peuvent être pompés et disposés par des points centraux. Cependant, la sécheresse peut causer des fissurations qui peuvent entraîner l'apparition de passages préférentiels et l'augmentation de la génération de DMA, mais elle permet aussi d'améliorer la stabilité physique. (Demers et Pabst, 2020)

3.3.3 Résidus filtrés

L'extraction supplémentaire d'eau conduit à la production de résidus filtrés ou en anglais *filtered tailings*. À la base, la technique fut développée pour diminuer les risques de liquéfaction et comme solution de transport des résidus dans les climats très froids (Demers et Pabst, 2020). C'est le type de résidus ayant la plus grande concentration solide des trois techniques présentées.

La filtration des rejets peut être réalisée en appliquant une pression élevée ou sous vide. Les structures nécessaires pour retirer une telle quantité d'eau (les résidus peuvent atteindre jusqu'à 80 % solides) comprennent des filtres à tambours, des plaques de compressions empilées verticalement ou horizontalement, ainsi que des bandes de filtration. La filtration par pression s'applique pour une variété de matériels via un système de filtres à bande sous vide. (Davies, 2011) Le processus est divisé en plusieurs phases et l'eau est retirée progressivement (Demers et Pabst, 2020).

La distribution granulométrique et la minéralogie des résidus impactent la filtration. Une haute teneur en particules argileuses par exemple peut diminuer la performance de la technique. Les techniques de filtration doivent donc pouvoir s'adapter aux changements de production sur la mine en limitant les impacts économiques. (Davies, 2011)

Les résidus qui sortent des procédés de filtration sont ensuite transportés par convoyeur ou par camions dans les aires de déposition/stockage. Ils sont déposés puis étendus et compactés sur la surface et forment

un empilement non saturé, dense et stable de résidus (Davies, 2011). La construction de digue pour l'entreposage n'est donc généralement pas nécessaire (Bussière, 2007).

Le transport de résidus filtrés est plus coûteux puisque l'utilisation de convoyeurs ou de camions est plus dispendieuse que le déchargement par pompe. Le coût va dépendre de plusieurs facteurs comme la distance de l'usine au parc, les conditions climatiques et la quantité de résidus produits. (Bussière, 2007)

La technique augmente potentiellement le risque de génération de drainage minier acide, puisque les résidus sont exposés à l'air. L'utilisation de systèmes de couverture temporaire peut néanmoins permettre de contrôler les échanges avec l'atmosphère. (Demers et Pabst, 2020) Optimiser le système d'épaississement est un travail de plusieurs mois.

Les projets qui peuvent utiliser cette méthode se situent généralement dans des régions arides ou avec des conditions climatiques froides. L'extraction de l'eau et la réutilisation de cette dernière sont des avantages intéressants pour les entreprises. (Simms, 2017) Les sites où l'activité sismique est élevée/importante bénéficient de l'utilisation de cette méthode parce que la stabilité physique est plus élevée. Le stockage dans des zones avec des pentes est aussi possible contrairement aux installations classiques. (Mine Environment Neutral Drainage [MEND], 2017) Si une défaillance survenait, les conséquences se limiteraient localement. Enfin, la restauration des aires d'entreposage de résidus filtrés peut se faire progressivement, permettant ainsi un meilleur contrôle des risques de génération de DMA.

Les avantages généraux de cette méthode incluent la récupération de l'eau, la récupération des agents de procédés et la maximisation de la densité des résidus dans les aires d'entreposage, et une diminution des risques d'instabilités des ouvrages de retenue. Le développement de nouvelles technologies a permis d'améliorer la performance environnementale, économique et sociale des techniques déjà utilisées pour la densification des résidus. (V.Boger, 2013)

3.4 Co-disposition

La co-disposition, c'est-à-dire la déposition simultanée et conjointe de stériles miniers et de rejets de concentrateurs est employée depuis plusieurs décennies (Bussière, 2017). Diverses techniques ont été développées afin d'améliorer le comportement hydrogéologique et géomécanique des rejets en profitant des avantages de chacun des matériaux (Demers et Pabst, 2020) Les trois grandes méthodes de co-disposition sont

- Les mélanges comme amalgames homogènes de résidus et de stériles miniers.
- La déposition en couche alternée.
- L'inclusion de roches stériles qui permet de compartimenter l'intérieur des ouvrages de retenues.

3.4.1 Mélanges

Le mélange de résidus de concentrateurs et de stériles miniers est réalisé avant la déposition dans l'aire d'entreposage. L'ajout de stériles aux résidus de concentrateur va permettre une augmentation de la résistance aux cisaillements qui était plus faible pour les résidus seuls. Dans l'autre sens, l'ajout de résidus aux stériles vient réduire le transport de l'oxygène et de l'eau. Une meilleure stabilité géochimique est obtenue ce qui réduit le risque de production de drainage minier acide. (Bussière, 2007) Le mélange idéal sera celui qui contient la quantité de résidus nécessaire pour tout juste remplir les espaces vides entre les stériles miniers (figure 3.4). Si les résidus ne permettent pas de remplir tous les pores (figure 3.4) alors le mélange se comporte plutôt comme les roches stériles avec quelques fines. Inversement, si la quantité de résidus est trop importante (figure 3.4) alors les particules grossières flottent dans la matrice de résidus et ne contribuent pas à améliorer la stabilité du matériau.

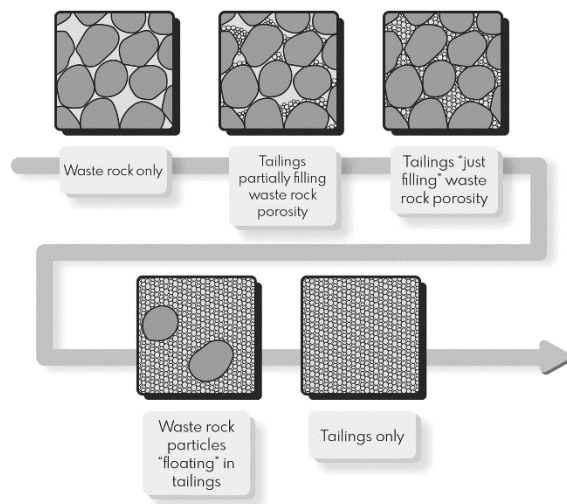


Figure 3.4. Différents niveaux de mélanges de stériles miniers et de résidus de concentrateur (tiré de : Demers et Pabst, 2020, p.333)

Le mélange idéal des deux matériau permet d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique et des propriétés sur la rétention d'eau qui se rapprochent de celles des résidus de concentrateur seuls. Le

mélange obtenu possède une conductivité hydraulique saturée inférieure à celle des stériles miniers. Le mélange a un faible niveau de compressibilité et est moins sujet aux problèmes de stabilité physique. (Bussière, 2007)

La déposition conventionnelle des rejets miniers crée une ségrégation des particules. Les plus grosses particules s'accumulent dans le bas des pentes créant des passages préférentiels pour l'eau et l'air dans les haldes à stériles. (Bussière, 2007) Cette technique permet également de réduire la taille des aires d'entreposage des rejets miniers puisque l'espace entre les stériles minier est comblé par les résidus de concentrateurs (Wilson, 2017).

Un facteur limitant de cette méthode est le risque de blocage des pompes lors du pompage du mélange. Si le ratio utilisé n'est pas idéal, une séparation des particules peut survenir et bloquer la tuyauterie. De plus, la technique a été principalement étudiée au laboratoire et dans des cellules expérimentales, mais rarement appliquée à grande échelle et de grands défis opérationnels subsistent, notamment en raison de la taille parfois importante des blocs de stériles. (Bussière, 2007)

Un système de recouvrement constitué d'un co-mélange peut également être employé comme une barrière à l'oxygène et à l'eau. La meilleure stabilité physique du mélange permet aussi de limiter les déformations, et de résister au cisaillement et l'érosion.

La stabilité physique des stériles combinés avec la faible conductiv  hydraulique des résidus de concentrateur permet d'obtenir un matériel de recouvrement solide et avec une bonne capacité de rétention de l'eau (Wilson, 2017).

Il est possible d'évaluer les caractéristiques physiques du mélange des rejets miniers sur le site par l'utilisation des cellules tests (Wilson, 2017).

3.4.1 Déposition en couche alternée

Contrairement au mélange où les résidus sont préalablement mélangés avant d'être disposés, la déposition en couche alternée consiste à déposer chaque matériau l'un après l'autre, alternativement.

La disposition des couches horizontales de résidus se fait dans des cellules d'une épaisseur de quelques mètres (figure 3.5). La grandeur de chacune des cellules de stériles est déterminée en fonction des besoins du site. Lorsque la cellule est remplie de rejets, il est possible d'ajouter une couche de stériles par-dessus pour permettre d'ajouter une autre rangée de résidus au-dessus. Cette technique permet d'obtenir une meilleure stabilité physique. (Wilson, 2017)

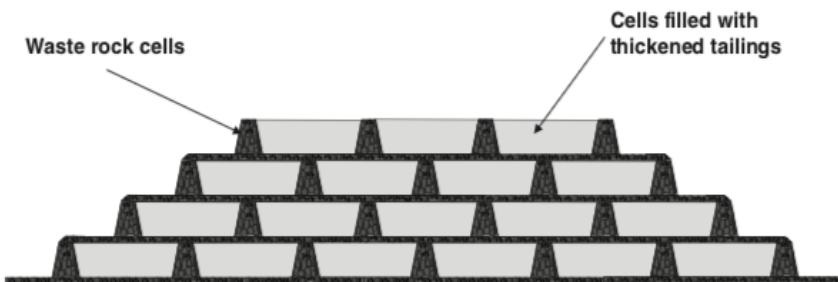


Figure 3.5 Cellules de stérile minier contenant des résidus densifiés (tiré de : Wilson, 2017, p.274)

L'alternance de couches de matériaux fins et grossiers permet de créer des effets de barrière capillaire et de maintenir un niveau de saturation élevé qui limite le flux d'oxygène et d'eau donc de réduire le potentiel de drainage minier acide. Cependant, la diffusion interne de l'air pourrait demeurer trop élevée et donc le risque de DMA n'est pas garanti lors de l'utilisation de cette technique. (Demers et Pabst, 2020)

3.4.1 Inclusions de roches stériles

Les ouvrages de retenues des parcs à résidus sont susceptibles aux instabilités en raison de leurs propriétés hydrogéotechniques (voir section 2.1).

Les résidus se consolident avec le temps ce qui augmente la densité interne et leur résistance au cisaillement. Mais cette consolidation est lente et se poursuit souvent après la fin des opérations. La co-disposition de roches stériles dans les parcs à résidus permet d'accélérer la consolidation. L'aire d'entreposage se retrouve donc divisée en cellule ce qui permet aussi de réduire les conséquences d'éventuelles défaillances. (Bussière, 2007)

La technique des inclusions de roches stériles consiste à placer des drains linéaires de roches stériles dans le parc au fur et à mesure des rehaussements successifs. La figure 3.6 démontre le genre de

compartimentations typiques créées par l'ajout des stériles. La majorité des inclusions sont près de la digue de retenue pour en améliorer la stabilité, surtout en cas de séisme.

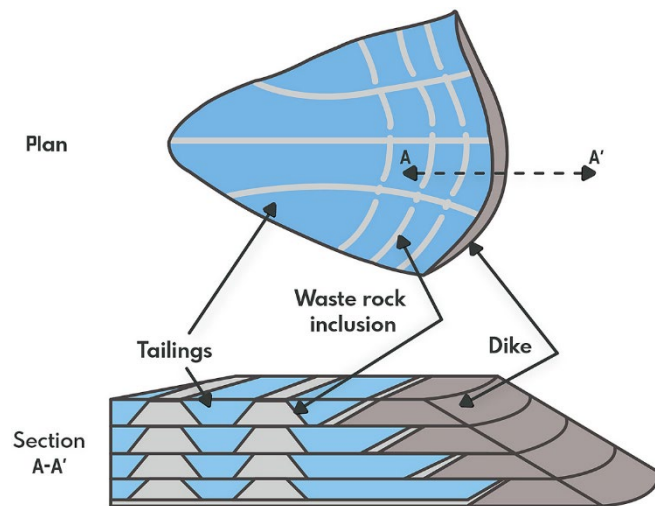


Figure 3.6 Structure d'un ouvrage comportant des inclusions de roches stériles (tiré de : Demers et Pabst, 2020, p.335)

Les roches stériles ont une conductivité hydraulique supérieure à 10^{-5} m/s, soit plus élevé que celle des résidus qui est habituellement comprise entre 10^{-8} et 10^{-5} m/s. La pression d'eau en excès générée par le remplissage progressif est dissipée par les inclusions de roches stériles qui constituent un chemin préférentiel pour l'écoulement de l'eau. Les inclusions permettent donc la consolidation rapide des résidus et donc l'augmentation de la résistance au cisaillement et de la stabilité. (L.Bolduc, 2012)

La conception des cellules vise à diminuer la pression interstitielle de l'eau qui est causée par la déposition des rejets de concentrateur dans l'ouvrage de retenue. Les cellules vont renforcer la structure lors des chargements dynamiques renforçant ainsi la stabilité du parc en cas de liquéfaction des résidus. Un avantage important des inclusions de roches stériles est la protection de l'ouvrage de retenue lors d'événements sismiques.

La zone d'influence horizontale des inclusions de stériles est environ le double de l'épaisseur des résidus de concentrateurs. La conductivité hydraulique des résidus saturés, la distance de l'inclusion, la capacité de compression et l'épaisseur des résidus ainsi que le taux de déposition constituent les principaux paramètres d'influences. (L.Bolduc et Aubertin, 2014)

Cette résistance supplémentaire apportée est avantageuse pour la protection de l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage de retenue comportant des inclusions puisque les inclusions renforcent les digues. De plus, si une rupture survenait, la quantité de résidus libérés dans l'environnement serait moindre due à la configuration des inclusions.

3.5 Valorisation

Cette section présente les différentes avenues de valorisation des rejets miniers qui permettent leur recyclage.

La valorisation des rejets miniers se fait majoritairement sur le site d'exploitation, mais dans certaines régions du monde comme au Maroc, l'utilisation des rejets pour la fabrication de matériel de construction est une pratique courante. Cette valorisation s'explique par le manque de matériel de construction. Cette technique est moins courante au Québec où les ressources naturelles comme le sable ou l'argile sont plus facilement disponibles. Certains risques comme la contamination par les métaux, le drainage minier acide et la crainte du public face à cette pratique constituent un frein à son développement. (Taha, 2017) Dans une optique de développement durable, il peut cependant être favorable d'utiliser des rejets miniers comme remplacement à certaines ressources naturelles.

Les propriétés physiques et chimiques des rejets permettent en effet de les utiliser comme matériaux de construction. La valorisation est une alternative environnementale intéressante qui permet de réduire la quantité de rejets à entreposer dans les parcs et les halles tout en limitant l'utilisation de ressources naturelles comme l'argile, le sable ou les granulats. Une caractérisation des rejets est nécessaire pour déterminer leur potentiel d'utilisation. Les risques de génération d'acide doivent être particulièrement étudiés. (Taha, 2017)

Parmi les utilisations possibles, les rejets de concentrateur des mines du cuivre peuvent remplacer le sable naturel pour la fabrication de béton. Une substitution jusqu'à 60 % est optimale pour conserver une bonne résistance mécanique, une durabilité et une résistance à l'abrasion du mélange. (Thomas et al., 2013) Les résidus de fer peuvent également être employés pour la production de matériel cimenté. Un remplacement jusqu'à 30 % du matériel par des résidus permet d'obtenir un mélange cimenté qui possède des propriétés mécaniques comparables au ciment Portland (Li et al., 2010). Des briques cuites sont aussi produites avec des rejets de calamine et de charbon. Le produit fini possède les propriétés physiques nécessaires. C'est donc une façon de réduire les quantités de rejets entreposés et de fournir du matériel pour la construction.

(Taha, 2017) L'utilisation des roches stériles pour la production de routes minières est une autre manière d'utiliser les rejets miniers comme matériel de construction (Laverdière, 2019).

Les enjeux liés à l'utilisation des rejets comme matériau de construction comprennent la distance à parcourir entre le lieu de production et d'utilisation. Parfois l'utilisation est directement sur le site, mais ça pourrait être pour un autre chantier. Au Maroc, des résidus de concentrateurs de la mine de Zeida et de Mibladen sont utilisés clandestinement pour le surfacage des murs d'habitations, cette utilisation pour le mortier est cependant durable et sans danger (Taha, 2017). À Val-d'Or, l'entreprise Fournier et fils est une compagnie de production de béton, concassage et travaux de génie civil. L'entreprise utilise les roches stériles de site minier inactif Sigma-Lamaque afin de s'approvisionner en gravier. (Québec circulaire, 2020)

L'hétérogénéité et la réactivité des rejets miniers complexifient leur utilisation. La valorisation sur site ou hors site comme amendement à un mélange demande une certaine homogénéité des matériaux au cours du temps afin de bien prévoir les caractéristiques finales du produit. L'acceptabilité sociale de ce type de gestion n'est pas encore atteinte. Les gens sont informés des risques associés aux rejets miniers. De plus, les règlements entourant cette pratique sont complexes et contraignants pour les entrepreneurs. (Taha, 2017)

4. RESTAURATION

Les entreprises minières sont responsables à 100 % de la restauration des sites à la suite de la fin de l'exploitation. La garantie financière couvre les frais de la restauration afin d'éviter que la société ne se retrouve avec des sites miniers abandonnés et non restaurés. Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles approuve les plans de réaménagement des entreprises. Une mise à jour de plan est exigée tous les cinq ans. (Association minière du Québec, s. d.) Les coûts représentent une partie importante du budget de l'entreprise.

Les exigences en termes de restauration s'appliquent pour les sites d'exploration et d'exploitation minière. Les sites doivent avoir un état satisfaisant selon le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles :

- Aucun risque inacceptable pour la santé et la sécurité des personnes n'est toléré.
- La production et la propagation de contaminant dans le milieu environnant doivent être limitées.
- Le site doit être dans un état visuellement acceptable.
- Les infrastructures du site doivent être compatibles avec un usage futur.

Une mise en végétation est exigée pour prévenir l'érosion et donner un aspect naturel au site. En plus des nombreuses exigences pour les bâtiments, les infrastructures et les équipements, les entreprises doivent respecter des critères pour la stabilité physique et chimique des aires d'accumulation. Un programme d'entretien et de suivi est exigé pour les ouvrages de retenues. Le choix des modes de gestion des stériles miniers doit se faire en fonction de la réduction des risques géotechniques en considérant plusieurs options qui vont aider au respect des exigences de restauration. Les techniques de restauration choisies doivent réduire les risques de contamination de l'environnement. Un niveau de stabilité chimique est exigé pour empêcher la génération du DMA et du DNC. (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2017)

Sur certains sites miniers, une technique servant à contrôler la réactivité des résidus miniers afin d'éviter le drainage minier acide est le recouvrement sous l'eau afin de limiter l'apport en oxygène. Il n'y a donc pas de lixiviation qui est observée dans tous les cas. Il est démontré que l'ennoiement de résidus miniers peut causer le relâchement de certains métaux comme le zinc. (Éthier, 2011) Bien que le niveau d'oxygène soit très faible dans l'eau, il est possible que l'oxydation des sulfures se produise quand même. La diffusion de l'oxygène dans l'eau atteint certains des résidus créant ainsi une oxydation lente, mais capable de libérer certains métaux dans l'environnement. (Plante, 2010)

5. PRESENTATION DE LA MATRICE

Afin de répondre à l'objectif général de cet essai soit de réaliser une analyse comparative des méthodes de gestion intégrées des rejets et de leur capacité à minimiser l'impact des principaux enjeux des opérations minières, des matrices ont été élaborées. Les différents défis ainsi que les méthodes proviennent de la revue de littérature préalablement présentée dans l'essai et illustre les différents les concepts. L'analyse comparative est un outil qui permet des résultats objectifs. En présentant de façon visuelle les méthodes pour répondre à chacun des défis, il est facile de repérer la méthode idéale pour un défi spécifique, mais aussi de voir les méthodes les plus polyvalentes. De plus, la combinaison de certaines méthodes pour répondre à un même défi permet d'optimiser différents avantages et réduire (ou partiellement compenser) les éventuels impacts négatifs de certaines approches. Il est possible de constater rapidement si une ou des méthodes sont à privilégier pour répondre à un défi.

L'analyse comparative se limite aux défis présentés dans les sections précédentes de l'essai même si ce n'est pas une liste exhaustive. C'est un recensement général des principales problématiques. Le même principe s'applique aux différentes méthodes de gestion des rejets miniers. L'évaluation de la résolution d'une problématique par une méthode a été réalisée de façon générale. Ce ne sont pas tous les éléments de chacune des méthodes qui entrent en ligne de compte puisque certaines informations ne sont pas disponibles.

5.1 Méthodologie

Afin de créer des graphiques qui aident à comparer chacune des méthodes pour les défis, il faut établir une échelle. Ce système permet de présenter l'efficacité d'une méthode à répondre à la problématique en comparaison avec une gestion conventionnelle. L'objectif ultime étant de gérer efficacement les rejets miniers, l'échelle contient plusieurs paliers. Une méthode peut répondre efficacement à une problématique, mais peut aussi nuire ou ne pas répondre à la problématique. Il y aura donc un palier qui est neutre puisque certaines méthodes ne présentent pas d'avantage ni d'inconvénient particulier pour les défis présentés par rapport à la gestion conventionnelle. L'utilisation d'une échelle simple et théorique est possible grâce à l'utilisation des généralités de la revue de littérature.

L'utilisation du graphique radar est la méthode sélectionnée pour la présentation des résultats. Ce type de graphique permet de visualiser facilement les différents niveaux obtenus par chacune des méthodes en fonction de l'échelle créée. Comparer les différentes méthodes entre les différents défis se fait rapidement.

Il est aussi facile d'inclure deux méthodes pour un seul défi et de comparer avec l'utilisation d'une seule méthode.

Finalement, l'interprétation des résultats a permis de produire une analyse qui justifie si une méthode ou une combinaison de méthodes est plus appropriée qu'une autre en incluant des nuances. L'analyse permet d'émettre des recommandations par la suite en fonction des conclusions qui sont tirées.

5.2 Présentation de l'échelle

L'échelle possède 7 paliers permettant de situer une méthode sur un niveau d'efficacité pour la résolution d'une problématique en comparaison à la gestion conventionnelle. Les catégories sont larges ce qui permet une interprétation de la littérature en tirant des généralités.

Tableau 5.2 Présentation des différents niveaux d'efficacité pour la résolution d'une problématique

Pondération	
-3	Accentue significativement
-2	Accentue fortement
-1	Accentue sensiblement
0	N'influence pas
1	Améliore sensiblement
2	Améliore fortement
3	Améliore significativement

Justification de la pondération :

(-3) : la méthode rend la problématique pire qu'elle l'était

(-2) : la méthode comporte des éléments qui entretiennent la problématique

(-1) : la méthode accentue légèrement la problématique

(0) : la méthode n'influence pas la problématique

(1) : la méthode amoindrit légèrement la problématique

(2) : la méthode améliore la problématique, mais il reste des enjeux mineurs

(3) : la méthode aide à prévenir/régler la problématique

Une comparaison avec l'approche conventionnelle (méthode actuelle) (0) de couleur orange pâle permet aux lecteurs de bien voir les différents niveaux atteints de chacune des méthodes officiellement présentées. La problématique des coûts est divisée en coûts de restauration et capex/opex afin de permettre une analyse plus en détail.

6. ANALYSE

L'analyse de la performance des techniques face aux différents défis (paramètres) a permis de cibler des méthodes en fonction des défis et de visualiser le poids des problématiques qui ne sont pas uniquement d'ordre économique. De plus, la combinaison de deux méthodes reflète les avantages possibles en termes d'innovation et de performance.

6.1 Analyse de la désulfuration environnementale

La désulfuration environnementale produit un concentré de sulfures et une fraction désulfurée (figure 6.1) qui possèdent chacune une pondération différente pour les paramètres étudiés.

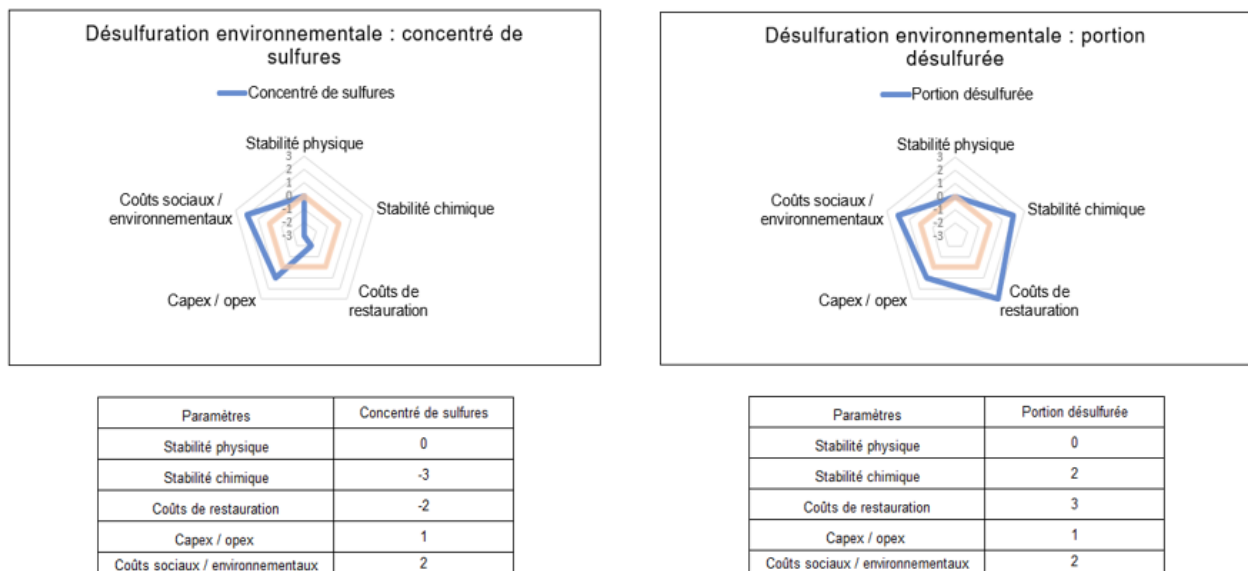


Figure 6.1 Performance de la désulfuration environnementale

La production des deux fractions n'a aucun impact sur la stabilité physique des rejets, le pointage de 0 (neutre) est donc attribué.

Le circuit de flottation pour la désulfuration s'intègre à la fin du procédé de traitement (Benzaazoua et al., 2008) entraînant un certain investissement de la part des entreprises. L'achat des collecteurs constitue un autre coût. Les impacts financiers restent cependant limités dans l'ensemble puisque la production des

deux fractions permet d'économiser lors de leur disposition. La séparation de la portion sulfurée permet en effet une gestion plus simple et plus efficace des rejets. Ainsi, le concentré de sulfures est généralement intégré aux remblais (voir aussi section 3.2.1) ce qui permet de les isoler et de prévenir les risques de génération de drainage contaminé. La fraction désulfurée pour sa part peut être valorisée dans la construction des recouvrements (Demers et al., 2008). Le pointage de 1 (capex/opex) est donc donné pour les deux fractions.

La stabilité chimique des deux portions est très différente. Le concentré de sulfure a un fort potentiel de génération de DMA en raison de teneurs en sulfures élevées. Cette instabilité géochimique amène à attribuer la cote de -3 pour la portion concentrée de sulfure. À l'opposé, la portion désulfurée contient peu ou pas de sulfures et le matériau est considéré non générateur (Buisnière, 2007), ce qui réduit complètement le risque de DMA ou de DNC. La cote de 2 est attribuée.

La restauration est également différente pour les deux portions. Le concentré de sulfure est problématique pour la stabilité à long terme. Mais les volumes de résidus à entreposer en surface sont largement réduits et peuvent même être nuls si le concentré est utilisé comme remblais. La note de -2 est attribuée. Pour la portion désulfurée, les options sont plus nombreuses : utilisation comme matériel de construction pour les recouvrements, ajout dans un mélange de ciment sur site ou hors site (Li et al., 2010). Si la fraction désulfurée ne peut pas être valorisée en totalité, une partie devra être entreposée en surface. La restauration des aires d'entreposage sera néanmoins largement facilitée puisque ces matériaux sont non générateurs de drainage minier contaminé. Toutes les options permettent d'attribuer la note de 3.

6.2 Analyse remblais

La technique du remblai s'applique autant aux fosses (opérations en surface) qu'aux galeries et chantiers (opérations souterraines). Le remblai va répondre aux problématiques des deux types d'opérations de façons différentes (figure 6.2).

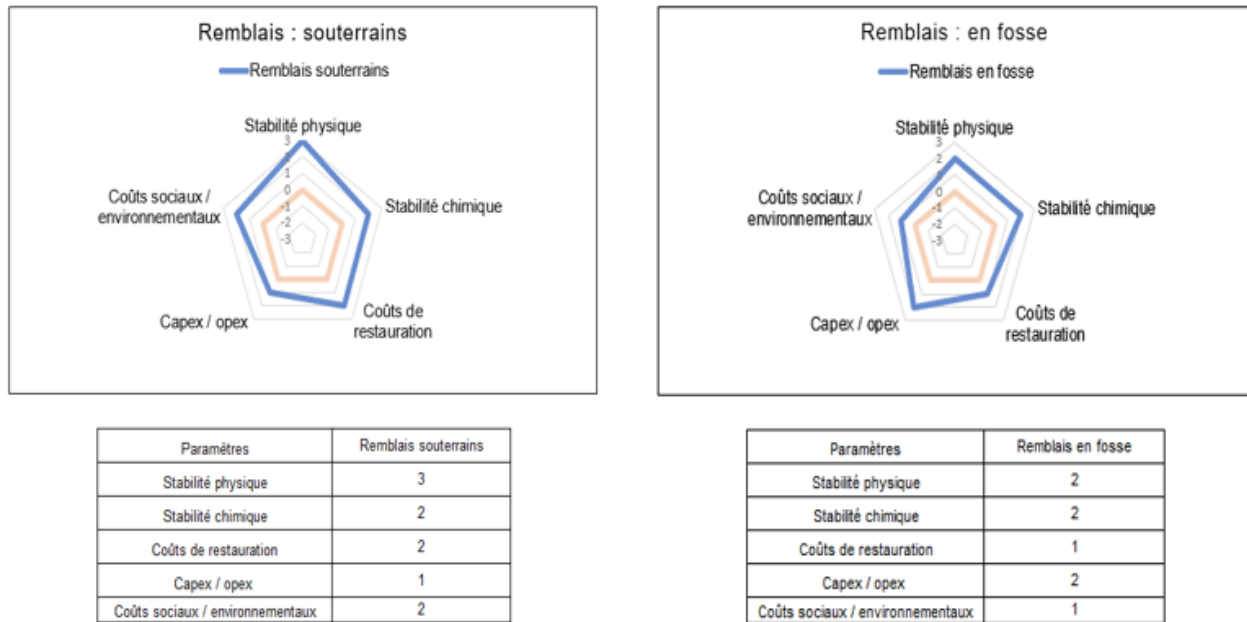


Figure 6.2 Performance du remblai

Le remblai souterrain permet d'améliorer significativement la stabilité physique (cote de 3) en permettant d'assurer la sécurité des travailleurs (Benzaazoua et al., 2004) et la continuité de la production, mais aussi de réduire les volumes des rejets entreposés en surface et donc de réduire les risques d'instabilités des parcs à résidus.

La cote de 2 est attribuée pour la stabilité chimique puisqu'en envoyant les résidus problématiques (générateurs de DMA) dans les galeries ou les fosses, le contact avec l'oxygène et l'eau est diminué mais pas éliminé au complet (Coussy et al., 2012). Les concentrés de sulfures sont ainsi généralement privilégiés pour le remblai (voir section 3.2.1).

La restauration du site avec un remblai souterrain est facilitée parce qu'il y a moins de résidus en surface ce qui augmente également l'acceptabilité sociale de la technique en plus d'améliorer l'intégration paysagère post-fermeture (cote de 1). Les coûts opérationnels de cette technique demandent un faible

investissement (utilisation de la gravité principalement en plus de pompes pour le transport) largement compensé par une augmentation substantielle de la production et la récupération des piliers. Cependant, le coût du ciment est élevé. Une cote de 2 est donc attribuée. De manière générale, le remblai souterrain répond bien à l'ensemble des problématiques (cote positive pour tous les défis présentés).

Le remblayage des fosses permet aussi d'améliorer la stabilité physique (cote de 3) en diminuant le risque d'instabilité des digues par la réduction de la taille des parcs en surface (Johnson et Carroll, 2007), et de contribuer à stabiliser les parois des fosses.

Plusieurs incertitudes demeurent néanmoins quant à la stabilité chimique des rejets. La connexion avec les eaux souterraines à travers le roc fracturé pourrait contribuer à la propagation de contaminants dans l'environnement (Johnson et Carroll, 2007). Cependant, la génération de DMA est contrôlée par la diminution du contact avec l'air dans le cas où des lacs de fosse sont formés.

La restauration d'un site ayant utilisé une méthode de remblais en fosse est relativement aisée (notamment par la formation d'un lac de fosse) et la cote de 1 est attribuée.

6.3 Analyse valorisation

La valorisation des rejets miniers est une méthode de plus en plus considérée et employée.

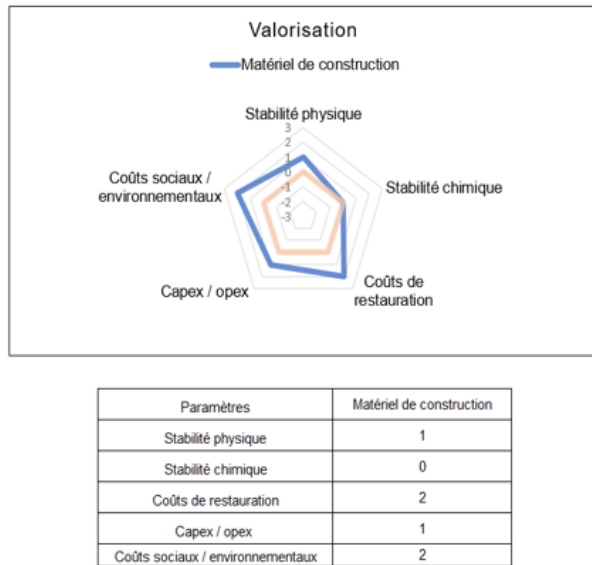


Figure 6.3 Performance de la valorisation

La valorisation de rejets miniers comme matériel de construction de routes et d'infrastructures sur le site permet de diminuer la taille des aires d'entrepôts et de réduire les dépenses liées à l'achat de matériaux de construction (granulats). Les matériaux doivent cependant être non générateurs de DMA (soit naturellement, soit après désulfuration). Les propriétés mécaniques et hydrogéologiques des rejets miniers (autant les stériles que les résidus) permettent leur utilisation comme remplacement dans de nombreuses applications (Thomas et al., 2013) à moindre coût. Cette avenue permet de diminuer la quantité de rejets entreposés en surface (cote de 2) (Taha, 2017; Tardif-Drolet et al., 2020).

La valorisation des matériaux ne permet pas d'améliorer la stabilité chimique des rejets puisque seuls les rejets non générateurs sont considérés pour cette technique. La cote de 0 (neutre) est donc attribuée.

Les coûts d'opération de la valorisation sont réduits puisque l'entreprise réutilise les matériaux sur son site ce qui réduit les coûts de transport et d'achats de matériaux naturels. Les ressources naturelles sont également préservées. Une diminution de la production de gaz à effet de serre est aussi possible puisque la distance à parcourir pour le transport des matériaux est moindre (cote de 2).

La valorisation des matériaux hors site est une pratique peu commune au Québec puisque l'apport en matériaux naturels est facile. L'acceptabilité sociale de cette méthode est également incertaine, car le public a toujours des craintes quant à la stabilité chimique et les risques environnementaux.

6.4 Analyse co-disposition

La technique de co-disposition se décline en trois grandes méthodes : les mélanges, la déposition en couche alternée et les inclusions de roches stériles. Les mélanges et la déposition en couche alternés sont présentés ensemble puisque les avantages sont similaires.

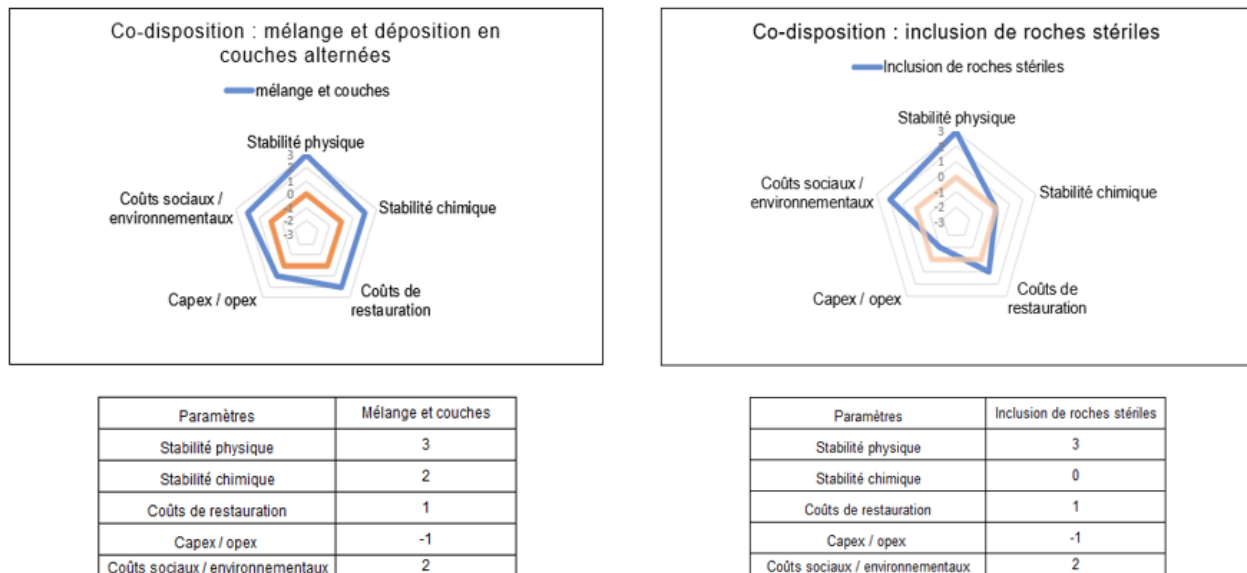


Figure 6.4 Performance de la co-disposition

Les mélanges et les inclusions de roches stériles permettent d'améliorer significativement la stabilité physique des parcs à résidus. Les mélanges augmentent la résistance au cisaillement des matériaux. Les inclusions de roches stériles permettent d'accélérer la consolidation des rejets et augmentent la résistance globale du parc à résidus, en particulier face aux risques de liquéfaction statique et dynamique (L. Bolduc, 2012; Ferdosi et al., 2015). Les deux techniques se voient donc attribuer la cote de 3.

Les mélanges augmentent la capacité de rétention d'eau des matériaux, et réduisent leur conductivité hydraulique et leur porosité ce qui limite la génération de DMA. Le mélange reste cependant exposé à l'air libre donc l'oxydation des sulfures n'est pas totalement écartée, d'où une note de 2.

Les inclusions de roches stériles permettent d'isoler les roches stériles réactives, mais les rejets de concentrateurs restent susceptibles de générer du DMA s'ils sont réactifs. La cote de 0 (neutre) est donc attribuée. L'impact positif ou négatif de l'utilisation de cette technique sur la stabilité chimique sera différent selon les sites en fonction de la nature des résidus et des ouvrages de retenue.

Les coûts d'investissement et d'opération pour la technique des mélanges sont importants (cote de -1) puisque le pompage des matériaux n'est pas possible et que l'utilisation d'un système de convoyeur ou de transport par camion est coûteuse. La même note est attribuée aux inclusions de roches stériles parce que cette technique demande aussi des investissements initiaux pour la mise en place de la structure et un apport financier tout au long des opérations pour monter les inclusions au même rythme que le bassin.

Les deux méthodes ont de nombreux avantages par rapport aux risques environnementaux (cote de 2) puisque la stabilité physique des digues est accrue. La possibilité d'une rupture et d'une contamination du milieu est faible.

6.5 Analyse densification

La méthode de densification se décline en trois niveaux de déshydratation soit les rejets épaisés, les résidus en pâtes et les résidus filtrés. Pour l'analyse, les rejets épaisés et les résidus en pâte sont analysés ensemble dû à leurs similitudes.

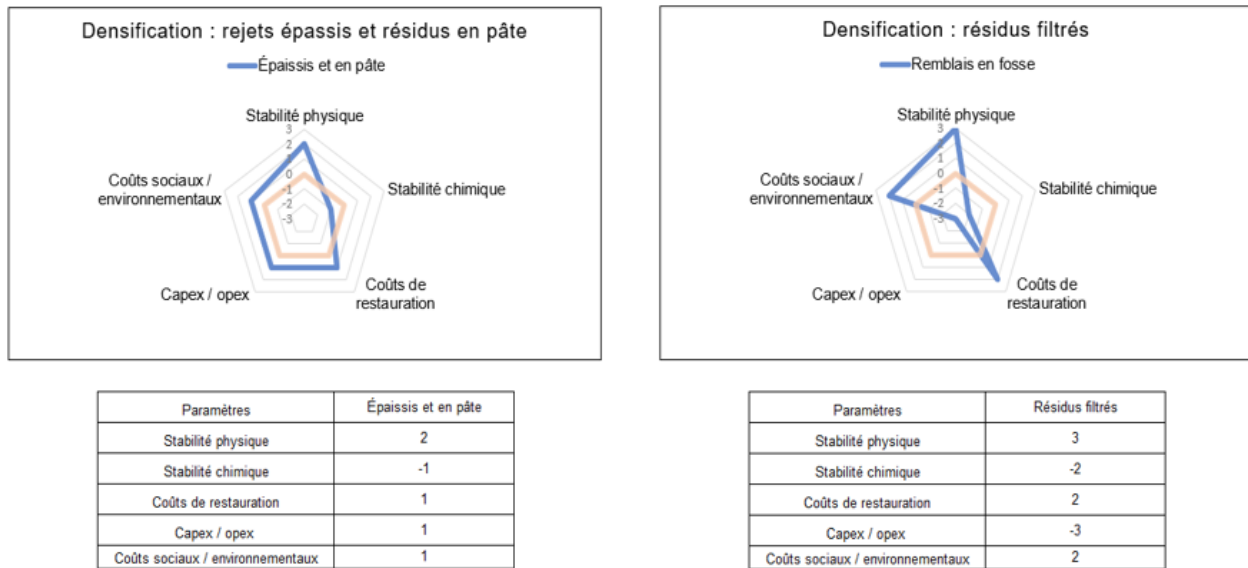


Figure 6.5 Performance de la densification

Les rejets épaisés et les résidus en pâte permettent d'améliorer significativement la stabilité physique des parcs à résidus, mais des ouvrages de retenue restent nécessaires (Simms, 2017) d'où une cote de 2. Une note de -1 est attribuée à la stabilité chimique puisque le risque de DMA est augmenté par la désaturation rapide des rejets et leur exposition à l'air libre. La restauration d'un parc à résidus épaisés et en pâte se fait assez rapidement parce que le matériel est plus sec et permet une circulation sur le site pour terminer les travaux de fermetures. Les coûts d'investissement et opérationnels sont importants. Les épaisseurs nécessaires pour cette technique sont coûteux (Bussière, 2007). Cependant, le transport est possible par pompage (Simms, 2017) qui est une option moins dispendieuse que par camion.

Aucun ouvrage de retenue n'est nécessaire pour les résidus filtrés, car le niveau de désaturation est élevé (Davies, 2011) et la cote de 3 est attribuée pour la stabilité physique de cette technique. L'impact de la filtration sur la stabilité chimique est largement négatif (-2) si les résidus sont réactifs, puis les matériaux sont désaturés dès la mise en place ce qui augmente la diffusion d'oxygène et les réactions d'oxydation

(Demers et Pabst, 2020). Les coûts opérationnels des résidus filtrés sont élevés (-3). Le transport par convoyeur ou camion (Simms, 2017) en plus de la compaction en place sont très coûteux. La mise en place d'infrastructures est aussi nécessaire pour la filtration, qui est très énergivore et mal adaptée aux grandes opérations.

6.6 Analyse combinée remblai souterrain et désulfuration

L'utilisation du concentré de sulfure provenant de la désulfuration comme remblai souterrain est une technique permettant d'optimiser les opérations.

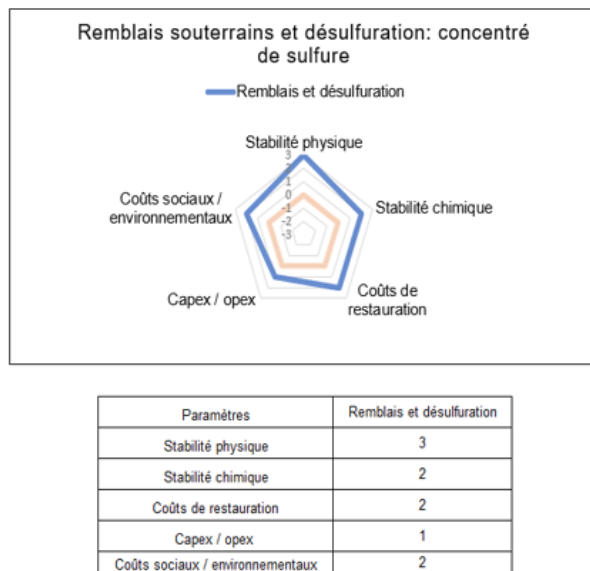


Figure 6.6 Performance du remblai et de la désulfuration

La combinaison des deux approches permet d'attribuer une cote de 3 pour la stabilité physique puisque l'utilisation d'un concentré de sulfures n'a pas d'impact sur les propriétés mécaniques du remblai.

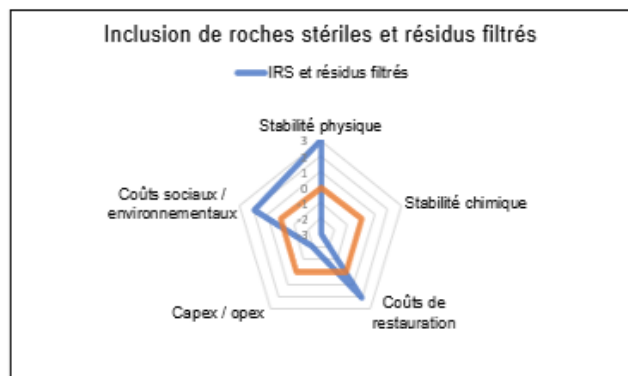
La stabilité chimique des deux méthodes combinées est de 2. Ce score est bien supérieur au cas du concentré de sulfure seul qui était de -3. En effet, le risque de DMA est significativement réduit par la limitation du contact avec l'eau et l'air, notamment grâce à l'ajout de liants au mélange.

Le remblai souterrain facilite aussi la restauration des sites puisqu'une importante partie du matériel est envoyé sous terre, réduisant ainsi la taille des aires d'entreposage de résidus générateurs de DMA en surface (cote de 2).

Les entreprises maximisent leur production et sont avantagées financièrement par la combinaison de ces techniques puisque la taxe sur les dépositions en surface est réduite. Bien que la désulfuration et le remblayage (achat de ciment) entraînent des coûts de production importants, ceux-ci sont compensés par la diminution des coûts de gestion, la récupération des piliers (et donc l'augmentation de la production) et la réduction des risques de DMA.

6.7 Analyse combinée inclusion de roches stériles et résidus filtrés

Les inclusions de roches stériles dans les ouvrages contenant des résidus filtrés est une technique utilisée par différentes entreprises comme la mine Eleonore.



Paramètres	IRS et résidus filtrés
Stabilité physique	3
Stabilité chimique	-3
Coûts de restauration	2
Capex / opex	-2
Coûts sociaux / environnementaux	2

Figure 6.7 Performance des inclusions de roches stériles et des résidus filtrés

Les IRS et les résidus filtrés permettent chacune d'obtenir un bon niveau de stabilité physique donc la combinaison des deux permet le même résultat (mais sans gain de stabilité significatif). Les risques reliés aux instabilités physiques seront donc faibles, voire inexistants (cote de 3).

La cote de -3 est attribuée pour la stabilité chimique puisque la combinaison des méthodes ne change pas la composition chimique et que les risques de génération de DMA restent très importants si les rejets sont générateurs de DMA.

La combinaison des deux techniques représente un investissement significatif pour les entreprises. Les résidus filtrés sont en effet coûteux à produire et transporter. Les inclusions de roches stériles requièrent aussi des travaux tout au long de la durée de vie d'une mine. En tenant compte des divers facteurs, la cote de -2 est attribuée aux capex/opex de cette combinaison. La mine Eleonore à la Baie-James utilise une combinaison de ces deux techniques pour la gestion des rejets miniers produits par les opérations (les rejets de la mine Éléonore sont non générateurs de drainage minier contaminé). De manière générale, la combinaison des deux techniques n'a pas d'impact significatif important comparativement aux deux approches utilisées de manière séparée. Dans le cas d'une mine souterraine cependant, l'utilisation d'inclusions de roches stériles permet d'éviter de construire une halde à stériles (et réduit donc l'empreinte en surface).

6.8 Analyse combinée valorisation et désulfuration

L'utilisation de la portion désulfurée comme matériel de construction est une combinaison de techniques permettant une forme d'économie circulaire sur le site.

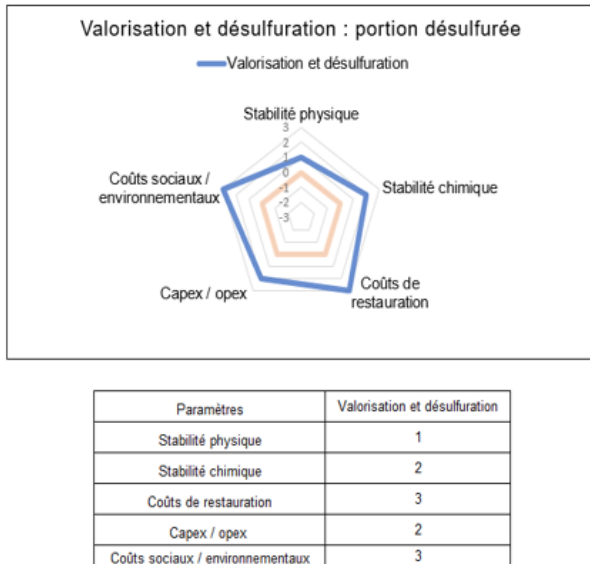


Figure 6.8 Performance de la valorisation et de la désulfuration

La combinaison de ces deux techniques est avantageuse à plusieurs égards pour les entreprises (tous les paramètres sont positifs). Le processus de désulfuration permet de retirer la majorité des composants de sulfures ce qui leur confère une bonne stabilité chimique (cote de 2) puisque le risque de génération de DMA est pratiquement nul. L'utilisation de ce matériel est sécuritaire pour les travailleurs et l'environnement.

La valorisation de ce matériel permet d'éviter d'utiliser des ressources naturelles venant de l'extérieur de la mine. Les rejets désulfurés sont utilisés dans différentes structures sur la mine au lieu d'autres matériaux qui devraient être achetés par l'entreprise. La diminution du besoin en transport réduit la production de gaz à effet de serre, car le matériel se trouve directement sur le site minier.

La réduction des volumes de rejets entreposés dans les parcs rend la restauration du site plus facile et moins coûteuse (cote de 3). Les avantages liés à cette combinaison de méthodes seront donc significatifs si une quantité importante de matériel désulfuré est utilisée.

Les analyses présentées permettent de mettre en valeur les forces des diverses techniques employées par les entreprises. Chaque site a des besoins et des problématiques différentes ce qui nécessite de nombreuses techniques de gestion. La combinaison de multiples techniques apporte plusieurs avantages, car les différentes forces sont combinées et les éventuelles limitations de l'une peuvent être compensées (au moins partiellement) par l'autre.

7. RECOMMANDATIONS

Les recommandations sont formulées à partir de la revue de littérature et de l'analyse effectuées dans le cadre de l'essai. Certaines s'appliquent à un large spectre de la gestion des rejets miniers et d'autres sont plus précises. Dans l'ensemble, des actions sont possibles afin d'améliorer les aspects sociaux, environnementaux et économiques de la gestion des rejets miniers. Un travail à long terme est nécessaire, un partage des connaissances avec le public est recommandé ainsi qu'un développement technologique des méthodes.

7.1 Recommandations en recherche et développement

L'innovation et l'amélioration continue sont des aspects qui contribuent au développement technologique nécessaire de cette industrie. Les techniques discutées dans cet essai sont les résultats de longs travaux de recherche au cours de la dernière décennie.

- Poursuivre les essais et les recherches sur les différentes techniques afin de faire progresser les méthodes et ajouter des données. Le développement technologique est essentiel pour l'amélioration des techniques de gestion afin de minimiser les différents défis. Les nouvelles techniques doivent s'adapter à une réalité changeante (au niveau climatique, changement des mentalités, protection de l'environnement) ainsi qu'aux conditions environnementales des sites. Par exemple : le développement de techniques pour la gestion des rejets miniers dans le Nord-du-Québec sera différent de celles au sud.
- La diffusion de données sur les coûts de gestion actuels (détaillés) par les entreprises. Le coût réel de la gestion des rejets miniers est difficile à obtenir puisque de nombreux paramètres sont à considérer. Cependant, le manque d'informations publiques rend difficile l'analyse financière entre deux méthodes. Le partage des aspects économiques par les entreprises pourrait aider les chercheurs dans leur développement de méthodes.
- Intégrer davantage les effets des changements climatiques sur les méthodes et les problématiques de gestion. Le climat a un impact sur la stabilité physique des ouvrages de retenues et les méthodes utilisées à long terme. Les événements climatiques extrêmes seront de plus en plus fréquents et auront des impacts sur la gestion des rejets miniers.

- Développer davantage les techniques de valorisation hors site en accompagnant davantage les entreprises afin de faciliter cette méthode de gestion. Les rejets qui ont une valeur commerciale devraient être utilisés dans le domaine de la construction par des entreprises afin de diminuer les coûts et conserver des ressources naturelles.

7.2 Recommandations liées aux communautés

La création d'un lien de confiance avec les communautés touchées par un projet est nécessaire pour le bon déroulement du projet et le partage de connaissances.

- Bien qu'une procédure de consultation publique soit en place, des réactions négatives face aux nouveaux projets de la part du public sont des événements communs pour les entreprises. Une révision de la méthode de consultation publique devrait être entreprise afin de créer de meilleurs liens avec les communautés. Par exemple une partie de la communauté de Saint-Michel-des-Saints s'inquiète de la méthode de gestion sélectionnée par Nouveau Monde Graphite et sont mécontents (Riopel, 2020) malgré tout le processus effectué par l'entreprise.
- Développer davantage les méthodes de gestion qui vont mener à une utilisation du site après la restauration terminée. Par exemple : parc, sentiers de marches ou activités municipales. Les citoyens doivent retrouver/profiter du territoire même si c'est de manière différente. C'est également bénéfique pour la construction d'écosystème propre au site. Les méthodes de gestions qui vont permettre une végétalisation par la suite vont mener à des projets intéressants par la suite. Cependant, certaines méthodes qui nécessitent des ouvrages de retenues ne vont pas permettre une utilisation récréative du site par mesure de sécurité. Celles-ci ne doivent pas non plus risquer d'endommager les ouvrages de restauration.
- Améliorer la communication avec les citoyens / public lors du choix de la méthode de gestion des rejets miniers. Les réactions observées chez les citoyens démontrent un manque d'information et parfois de connaissance sur la méthode choisie par l'entreprise. Des craintes et des questionnements sont soulevés et pourraient être résolus avant si les citoyens avaient reçu l'information adéquate. Les préjugés sont ancrés dans la mentalité des gens par des exemples négatifs du passé. Un réel échange afin de démystifier les différentes techniques (surtout les plus nouvelles, comme celles décrites dans cet essai) est nécessaire.

7.3 Recommandations liées aux techniques

Les techniques existantes sont en constantes évolutions. Les recherches et les expériences terrain permettent d'apporter des suggestions spécifiques à certaines méthodes.

- Lors des remblais souterrains et en fosse, ce ne sont pas tous les rejets qui peuvent y être déposés. Les entreprises qui disposent d'un tel espace pour stocker les rejets devraient viser davantage la valorisation matérielle pour éliminer le besoin d'aires d'entrepôts.
- La désulfuration environnementale devrait toujours être jumelée à une autre technique afin de maximiser l'utilisation des deux fractions produites par la méthode. Le but ultime étant de réduire la taille des aires d'entrepôts.
- L'utilisation d'inclusions de roches stériles dans les ouvrages de retenue devrait être plus développée/considérée. Cette technique permet de diminuer plusieurs facteurs de risques sur la sécurité et l'environnement et de réduire les volumes occupés par les aires d'entrepôt.
- Dans les régions avec une activité sismique élevée, toutes les techniques qui diminuent/éliminent le besoin d'un ouvrage de retenue devraient être favorisées et encouragées. L'effondrement de barrage a des conséquences sur les secteurs économiques, sociaux et environnementaux qui pourraient être évités en diminuant les risques d'instabilités physiques.

7.4 Recommandations pour les méthodes de gestion

Les approches de gestion des rejets actuelles (ou conventionnelles) sont sujettes à une amélioration continue.

- Favoriser la mise en place de multiples méthodes de gestion afin de bénéficier des différents avantages apportés par chacune des méthodes comme démontré dans l'analyse (section 6). La revue de littérature a aussi permis d'identifier les principaux défis et la combinaison de plusieurs méthodes peut s'avérer simple et bénéfique financièrement. Les entreprises ont avantage à se tourner vers des alternatives pour éviter des catastrophes comme des ruptures de digues ou la contamination environnementale.

- Les études de faisabilité devraient intégrer davantage les coûts environnementaux et sociaux. Les impacts potentiels sont listés et expliqués, mais l'importance/l'ampleur de ces impacts n'est souvent pas quantifiée. La méthode de gestion qui sera sélectionnée par l'entreprise ne doit pas contribuer à aggraver ces impacts à court et long terme. Les externalités négatives liées aux différents enjeux environnementaux et sociaux doivent davantage être mentionnées et prises en charge.

CONCLUSION

Les entreprises font face à des problématiques qui touchent un grand nombre de secteurs. Il ne s'agit plus uniquement d'une gestion de risques sur le site d'exploitation, mais bien du territoire élargi à court et long terme, et ce en harmonie avec les populations environnantes. L'opposition actuelle de certaines communautés ainsi que la mauvaise presse donnée par les sites miniers abandonnés contaminant l'environnement n'aident pas les entreprises dans leur gestion quotidienne.

La présente analyse a permis de démontrer qu'une réflexion approfondie sur le choix de la méthode de gestion était nécessaire. En plus des enjeux opérationnels comme la stabilité physique et géochimique s'ajoutent des enjeux sociaux et environnementaux. Les coûts de restauration ont aussi une influence sur le choix de la méthode. La pondération utilisée dans la méthodologie présente clairement le niveau d'efficacité pour la résolution d'une problématique. La visualisation des différents avantages et limites des techniques de gestion permet de comprendre que les coûts opérationnels ne sont pas les seuls à considérer et qu'un choix purement économique au moment de l'exploitation ne garantit pas une gestion efficace et économique à long terme. Les enjeux sociaux et environnementaux doivent avoir un poids décisionnel. Selon l'analyse, la combinaison de plusieurs méthodes apporte un réel avantage aux entreprises qui désirent avoir une gestion plus responsable de leurs rejets.

Les recommandations proposées permettraient une amélioration continue des techniques de gestion des rejets miniers. L'évaluation et le partage des coûts de gestion sont complexes, mais essentiels afin d'orienter la recherche et le développement. Les techniques de gestion doivent être pensées en fonction du type de restauration possible puisque cela détermine l'utilisation du territoire dans le futur. Certaines recommandations sont spécifiques à des techniques dans le but de prévenir plusieurs problématiques comme l'ampleur des aires d'entrepôts ou l'instabilité physique.

En conclusion, le choix d'une ou plusieurs techniques de gestion des rejets miniers permet de cibler et d'améliorer des problématiques spécifiques. L'évolution des enjeux liés à l'exploitation minière oblige les entreprises à revoir leur façon de faire afin de mieux gérer les nouveaux défis. Il serait pertinent de repenser à l'approche de gestion globale des entreprises minières afin d'éviter en amont des problématiques qui sont déjà connues ou prévisibles. Une inclusion plus active des communautés permettrait de démontrer que les entreprises évoluent dans leurs préoccupations et dans leur souci de la préservation de l'environnement. L'évolution constante de ce secteur promet de nombreux changements dans les années à venir.

RÉFÉRENCES

- Association canadienne des barrages. (s. d.). Digues à stériles.
https://www.cda.ca/FR/Technique/Digues_a_steriles/FR/Technique/Digues_a_steriles.aspx?hkey=61d7ab33-b60e-4d63-81d3-ee5501bbd6e9
- Association minière du Canada. (2017). *Guide de gestion des parcs à résidus miniers*.
https://mining.ca/wp-content/uploads/2017/11/Guide-de-gestion-des-parcs-a-residus-miniers-2017_0.pdf
- Association minière du Canada. (2018). *Faits et chiffres de l'industrie minière canadienne : faits et chiffres 2018*. <https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/03/Facts-and-Figures-French-Web.pdf>
- Association minière du Québec. (s. d.). Réaménagement et restauration des sites miniers.
<https://www.amq-inc.com/pages/reamenagement-et-restauration-des-sites-miniers>
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M. et Chapuis, R. P. (2013). Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers : partie 1 - mise en contexte et caractéristiques générales. *Déchets sciences et techniques*, (64), 29-36.
http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/2292/4_aubertin.pdf
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M. et Mbonimpa, M. (2016). Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. *American Society of Civil Engineers*, 343-358.
https://www.researchgate.net/publication/306061302_Review_of_the_Reclamation_Techniques_for_Acid-Generating_Mine_Wastes_upon_Closure_of_Disposal_Sites
- Barra de Vincenzo, C. (2011). Reclaiming the Jeffrey mine: An incisive process.
<https://cargocollective.com/cbdv/Reclaiming-the-Jeffrey-Mine-An-Incisive-Process>
- Belem, T. et Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
https://www.researchgate.net/publication/226106470_Design_and_Application_of_Underground_Mine_Paste_Backfill_Technology
- Benzaazoua, M. (s. d.). *Innovations en environnement minier : entre gestion intégrée en amont et restauration en aval*. <https://www.uqat.ca/resan/doc/mostafabenzaazoua.pdf>
- Benzaazoua, M., Bouzahzah, H., Taha, Y., Kormos, L., Kabombo, D., Lessard, F., Bussière, B., Demers, I., et Kongolo, M. (2017). Integrated environmental management of pyrrhotite tailings at Raglan Mine: Part 1 challenges of desulphurization process and reactivity prediction. *Journal of Cleaner Production*, 162, 86-95.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., et Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, 21(4), 330-340.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., et Marion, P. (2000). Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 60(1), 57-74.
https://www.researchgate.net/publication/222646649_Environmental_desulphurization_of_four_Canadian_mine_tailings_using_froth_flotation
- Benzaazoua, M., Fall, M. et Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.

- Bouchard-Bastien, E., Gervais, M.-C., Institut national de santé publique du Québec, et Direction de la santé environnementale et de la toxicologie. (2017). *Dimensions sociales et psychologiques associées aux activités minières et impacts sur la qualité de vie : état des connaissances*. https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2318_dimensions_sociales_psychologiques_activites_minieres.pdf
- Brisson, G., Morin Boulais, C., Doyon, S. et Bouchard-Bastien, E. (2017). Une difficile prise en compte des changements sociaux en milieu minier nordique : le cas de Malartic (Québec). *Recherches sociographiques*, 58(2), 387-413. <https://www.erudit.org/fr/revues/rs/2017-v58-n2-rs03273/1042168ar.pdf>
- Broadhurst, J., Amaral Filho, J., Moyo, A., Nwaila, P., Sampa N'Gandu, H., Shongwe, B., Sibanda, L., Stander, H.-M. et Harrison, S. (2019). *Resource efficient and socially responsible approaches for the integrated management of mine waste: Understanding the risks, opportunities, enablers and barriers*. <http://www.wrc.org.za/?mdocs-file=59098>
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. (2016). *Rapport 327 : projet d'agrandissement de la mine aurifère Canadian Malartic et de déviation de la route 117 à Malartic*. <http://voute.bape.gouv.qc.ca/dl/?id=00000059071>
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G., Potvin, R. et Benzaazoua, M. (2005). *Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entrepôts de rejets miniers abandonnés*. Communication présentée au Symposium 2005 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada. https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Bussiere/publication/267855816_PRINCIPAUX_DEFIS_ET_PISTES_DE_SOLUTION_POUR_LA_RESTAURATION_DES_AIRES_D%27ENTREPOSAGE_DE_REJETS_MINIERS_ABANDONNEES/links/5492d1e30cf2302e1d0742d8/PRINCIPAUX-DEFIS-ET-PISTES-DE-SOLUTION-POUR-LA-RESTAURATION-DES-AIRES-DENTREPOSAGE-DE-REJETS-MINIERS-ABANDONNEES.pdf
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.1139/T07-040>
- Bussière, B. et Guittouy, M. (2017). *Hard Rock Mine Reclamation: From prediction to management of acid mine drainage*. <https://www.routledge.com/Hard-Rock-Mine-Reclamation-From-Prediction-to-Management-of-Acid-Mine-Drainage/Bussiere-Guittouy/p/book/9781138054516>
- Canadian Malartic. (2019). Notre opération. <https://canadianmalartic.com/fr/a-propos/notre-operation/>
- Chou, L. C. (2012). *Caractérisation des propriétés mécaniques du remblai minier rocheux cimenté par des méthodes non-destructives* (Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada). https://publications.polymtl.ca/858/2/2012_LuluCatherineChou.pdf
- Cole, M. J. et Broadhurst, J. L. (2020). Mapping and classification of mining host communities: A case study of South Africa. *The Extractive Industries and Society*, 7(3), 954-964.
- Comité sectoriel de main-d'oeuvre de l'industrie des mines. (s. d.). Types de mines. <https://www.exploreslesmines.com/fr/secteur-minier/types-de-mines.html>
- Coussy, S., Benzaazoua, M., Blanc, D., Moszkowicz, P. et Bussière, B. (2012). Assessment of arsenic immobilization in synthetically prepared cemented paste backfill specimens. *Journal of Environmental Management*, 93(1), 10-21.

- Davies, D. M. (2011). *Filtered dry stacked tailings: The fundamentals*.
https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., & Blier, A. (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21(4), 317-329.
- Demers, I. et Pabst, T. (2020). Alternative and innovative integrated mine waste management approaches. Dans B. Bussière et M. Guittonny (dir.), *Hard rock mine reclamation: From prediction to management of acid mine drainage* (p. 321-350).
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/usherbrookemgh-ebooks/detail.action?docID=6386737>
- Demol, J., Ho, E., Soldenhoff, K. et Senanayake, G. (2019). The sulfuric acid bake and leach route for processing of rare earth ores and concentrates: A review. *Hydrometallurgy*, 188, 123-139.
- Derycke, V. (2012). *Optimisation de la désulfuration de produits miniers en vue de la diminution de leur potentiel polluant : effet de la granulométrie, du type de sulfures et évaluation de la qualité des eaux de drainage post-traitement* (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada). <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/504/>
- Environnement Canada. (2009). *Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux*.
<https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-fra.pdf>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2015). Guide pour la déclaration de résidus miniers et de stériles à l'Inventaire national des rejets de polluants (INRP). <https://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=FEC85072&printfullpage=true>
- Éthier, M.-P. (2011). *Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan* (Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada).
https://www.researchgate.net/publication/277123109_Evaluation_du_comportement_geochimique_en_conditions_normale_et_froides_de_différents_stériles_présents_sur_le_site_de_la_mine_Raglan
- Ferdosi, B., James, M. et Aubertin, M. (2015). Investigation of the effect of waste rock inclusions configuration on the seismic performance of a tailings impoundment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1519-1537.
- Fontaine, H. (2008, 10 juillet). Quand l'or déplace des maisons. *La Presse*.
<https://www.lapresse.ca/affaires/economie/200901/06/01-688462-quand-lor-deplace-des-maisons.php>
- Francoeur, L.-G. (2008, 7 juillet). Effondrement de la digue d'un parc à résidus miniers à Chapais : plan d'intervention et alerte écologique. *Le Devoir*.
<https://www.ledevoir.com/politique/quebec/196734/effondrement-de-la-digue-d-un-parc-a-residus-miniers-a-chapais-plan-d-intervention-et-alerte-ecologique>
- Helinski, M., Fahey, M. et Fourie, A. (2011). Behavior of cemented paste backfill in two mine types: Measurements and modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(2), 171-182.
- Hesketh, A. H., Broadhurst, J. L., et Harrison, S. T. L. (2010). Mitigating the generation of acid mine drainage from copper sulfide tailings impoundments in perpetuity: A case study for an integrated management strategy. *Minerals Engineering*, 23(3), 225-229.

- IAMGOLD corporation. (s. d). Glossaire. <https://www.iamgold.com/French/glossaire/default.aspx>
- Institut du Nouveau Monde. (2012a). *L'avenir minier du Québec : les sujets sociaux et de gouvernance*. <https://www.yumpu.com/fr/document/view/27302291/les-sujets-sociaux-et-de-gouvernance-institut-du-nouveau-monde>
- Institut du Nouveau Monde. (2012b). *L'avenir minier du Québec : les sujets environnementaux et de territoire*. https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/DepotNumerique_v2/AffichageFichier.aspx?id=69949
- Johnson, B. et Carroll, K. C. (2007). Waste Rock Backfill of Open Pits: Design, optimisation, and modelling considerations. https://www.researchgate.net/publication/281684538_Waste_Rock_Backfill_of_Open_Pits_Design_Optimisation_and_Modelling_Considerations/link/5c0685b1458515ae5445e350/download
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G. et Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- L. Bolduc, F. (2012). *Une étude sur l'utilisation des roches stériles comme inclusions drainantes dans les résidus miniers* (Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada). https://publications.polymtl.ca/867/2/2012_FrederickL.-Bolduc.pdf
- L. Bolduc, F. et Aubertin, M. (2014). Numerical investigation of the influence of waste rock inclusions on tailings consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9), 1021-1032.
- Larson, N. (2009, 11 février). Le casse-tête d'une ville contrainte de déménager. *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/actualites/insolite/200902/11/01-826344-le-casse-tete-dune-ville-contrainte-de-demenager.php>
- Laverdière, A. (2019). *Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières* (Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada). https://publications.polymtl.ca/3858/1/2019_AntoineLaverdiere.pdf
- Lévesque, F. (2014, 19 décembre). Cliffs écope d'une amende historique de 7,5 millions \$. *Le Soleil*. <https://www.lesoleil.com/actualite/environnement/cliffs-ecope-dune-amende-historique-de-75-millions--c030d1dad296b352ed4df145f450ce21>
- Li, C., Sun, H., Yi, Z. et Li, L. (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1), 78-83.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3^e éd.). <https://www.springer.com/gp/book/9783642124181>
- Matheus, P. (2018). Les techniques et conditions d'exploitation des mines aurifères. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, (4), 10-19. <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2018-4-page-10.htm>
- Mine Environment Neutral Drainage [MEND]. (2015). *In-pit disposal of reactive mine wastes: Approaches, update and case study results*. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.36.1b-In-Pit-Disposal.pdf>
- Mine Environment Neutral Drainage [MEND]. (2017). *Study of tailings management technologies*. http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf

- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2017). *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*. https://mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers_VF.pdf
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2003). *L'impact d'anciens parcs à résidus miniers sur la qualité de l'eau et les communautés benthiques de la rivière Massawippi et des ruisseaux Eustis et Capel*. http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/massa-eustis-capel/index.htm
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2012). *Directive 019 sur l'industrie minière*. http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf
- Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire et Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2016). *Aménager à proximité des sites miniers*. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/amenager_proximite_site_minier.pdf
- Moisan, M. et Blanchard, F. (2013). *Utilisation de la cyanuration dans l'industrie aurifère en Guyane : impacts potentiels sur l'environnement et recommandations*. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-30798-brgm-utilisation-cyanurisation-mine-or.pdf>
- Multotec Canada. (s. d.). Les six principales étapes du traitement du minerai de fer. <http://multotec.ca/fr/blogue/les-six-principales-etapes-du-traitement-du-minerai-de-fer/1/8>
- Nicholson, R. (2004). *Review of water quality issues in neutral pH drainage: Examples and emerging priorities for the mining industry in Canada*. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/10.1.pdf>
- Noirant, G. (2019). *Caractérisation de la pyrite dans les conditions de désulfuration environnementale à l'aide du xanthate et de collecteurs*. (Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada). https://depositum.uqat.ca/id/eprint/815/1/Memoire_GuillaumeNoirant.pdf
- Office québécoise de la langue française. (1984). Mort terrain. <http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/Resultat.aspx>
- Office québécoise de la langue française. (2017). Minéralisation. http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26543209
- Osisko. (s. d.). Osisko : redevances aurifères. <https://osiskogr.com/centre-medias/photos/>
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19(5), 407-419.
- Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrement placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés* (Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada). https://publications.polymtl.ca/673/1/2011_ThomasPabst.pdf
- Park, J. H., Edraki, M. et Baumgartl, T. (2017). A practical testing approach to predict the geochemical hazards of in-pit coal mine tailings and rejects. *CATENA*, 148, 3-10.
- Plante, B. (2010). *Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé* (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Abitibi-Témiscamingue, QC, Canada). <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/31/1/benoitplante.pdf>

- Québec circulaire. (2020). Valorisation des stériles miniers provenant de la fosse Sigma. <https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/valorisation-des-steriles-miniers-provenant-de-la-fosse-sigma.html>
- Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel*, RLRQ, c. Q-2, r.5
- Riopel, A. (2020, 29 juin). Projet minier : des craintes de pollution de l'eau demeurent à Saint-Michel-des-Saints. *Le Devoir*. <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/581599/des-craintes-de-pollution-de-l-eau-demeurent-apres-l-etude-d-un-projet-minier>
- Ritcey, G. M. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 78(1), 3-20.
- Rolfe, K. (2019, 23 avril). Statut social. *CIM magazine*. <https://magazine.cim.org/fr/environnement/social-standing-fr/>
- SGS. (s. d). Lixiviation par cyanuration. <https://www.sgs.ca/fr-fr/mining/metallurgy-and-process-design/cyanidation-technologies/cyanide-leaching#:~:text=Durant%20le%20processus%20de%20lixiviation,retir%C3%A9%20des%20tas%20ou%20colonnes>.
- Shields, A. (2020, 7 mars). L'héritage toxique des minières explose. *Le Devoir*. <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/574423/la-facture-des-sites-miniers-contaminees-et-abandonnees>
- Simard, M. (2018). L'industrie minière au Québec : situation, tendances et enjeux. *Études canadiennes*, (85), 193-217. [https://journals.openedition.org/eccs/1579#:~:text=L'industrie%20mini%C3%A8re%20conna%C3%AEt%20une,%2C%20or%2C%20etc.\)](https://journals.openedition.org/eccs/1579#:~:text=L'industrie%20mini%C3%A8re%20conna%C3%AEt%20une,%2C%20or%2C%20etc.)).
- Simms, P. (2017). 2013 Colloquium of the Canadian geotechnical society: Geotechnical and geoenvironmental behaviour of high-density tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(4), 455-468. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.1139/cgj-2015-0533>
- Taha, Y. (2017). *Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites : évaluations technique et environnementale* (Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Abitibi-Témiscamingue, QC, Canada). <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/697/1/Taha%2C%20Yassine.pdf>
- Thomas, B. S., Damare, A. et Gupta, R. C. (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 894-900.
- Toguri, J. M. (2015). Métallurgie. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/metallurgie>
- Wilson, W. (2017). Emerging technologies. Dans M. Hawley et J. Cuning (dir.), *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. (269-277) <https://ebookcentral.proquest.com/lib/usherbrookemgh-ebooks/reader.action?docID=4838419>
- V.Boger, D. (2013). Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. *Annual Review of Chemical and Biomolecular engineering*, 4, 239-257.